MEMORIAS DEL 65° CONGRESO INTERNACIONAL DE ACODAL: AGUA, SANEAMIENTO, AMBIENTE Y ENERGÍAS RENOVABLES.

SEXAGÉSIMA QUINTA VERSIÓN – 13, 14, 15 DE JULIO 2022

Nelson Castaño Contreras
Michelle Feuillet Guerrero
COMPILADORES

JUNTA DIRECTIVA

PRESIDENTE JUNTA DIRECTIVA:
Carlos Rufino Costa Posada

VICEPRESIDENTE JUNTA DIRECTIVA:
Pedro Nel González Escobar-Mexichem Colombia SAS PAVCO

MIEMBROS PERSONALES:
Carlos Rufino Costa Posada (p) – Diana Marcela Zapata Pérez (s)
Luis Alberto Jaramillo (p) – Amparo Cadena Lezama (s)

SECTOR INDUSTRIAL Y COMERCIAL:
Nicolás Restrepo Uribe –Accesorios y Válvulas Apolo SAS

SECTOR SERVICIOS PÚBLICOS:
Jairo de Castro Peña -Triple A S.A E.S.P.
Jorge Wilson Vega Arango –Acueducto y Alcantarillado Sostenibles SA ESP

SECTOR DE CONSULTORÍA Y/O INGENIERÍA:
Carlos Fernando Faccini – Acuameunier SAS

SECTOR UNIVERSITARIO:
Henry Maury Ardila - Universidad de la Costa CUC

VEEDOR:
Manuel Ricardo Ruiz Romero (p) – Iván Montaño Neisa (s)

PRESIDENTE EJECUTIVA:
Carlos Rufino Costa Posada

MIEMBROS SECCIONALES:

Seccional Caribe
Presidente: Claudia Patricia Carrillo Ortiz

Seccional Centro
Presidente: Carlos Andrés Eduardo Villamil

Seccional Occidente
Presidente: Jonathan Ochoa Galvis

Seccional Noroccidente
Presidente: Jaime Laíno Quiceno

CONGRESO INTERNACIONAL DE ACODAL: AGUA, SANEAMIENTO, AMBIENTE Y ENERGÍAS RENOVABLES.

Esta es una publicación de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental ACODAL.

Se recogen aquí las memorias del 65° Congreso Internacional de Agua, Saneamiento, Ambiente y Energías Renovables, evento que se realizó de manera virtual.

ISSN: 2539-0309 (En línea)
Bogotá, 12 de agosto del 2022.
©©Compiladores:
Michelle Feuillet Guerrero
Nelson Castaño Contreras
©© Varios Autores
©© Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental – ACODAL
Diagonal 60 No. 22 – 20
Bogotá D.C., Colombia PBX: 706 09 00
investigacion@acodal.org.co
Todos los derechos reservados. Prohibida su reproducción total o parcial, por cualquier medio o método sin autorización por escrito de ACODAL.

ACODAL
ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL

65° CONGRESO INTERNACIONAL
Agua, Saneamiento, Ambiente y Energías Renovables

Bogotá - Colombia
Centro de Convenciones Ágora
Julio 13, 14 y 15 de 2022

MEMORIAS DEL 65° CONGRESO INTERNACIONAL DE ACODAL: AGUA, SANEAMIENTO, AMBIENTE Y ENERGÍAS RENOVABLES

SEXAGÉSIMA QUINTA VERSIÓN
13, 14 y 15 de julio 2022

Nelson Castaño Contreras
Michelle Feuillet Guerrero
COMPILADORES

Contenido

Presentación……7

Tratamiento de Aguas Residuales en la Industria de Acabados Textiles: Aplicabilidad a Mipymes colombianas……..8

Remoción De PB(II) de soluciones acuosas usando residuos agro-Industriales de Café-Arabica y Cacao-Teobroma……29

Análisis Comparativo del Impacto de la Huella de Carbono de Concretos Marca CEMEX……42

Percepciones y Estrategias Asertivas de Comunicación del Cambio Climático en Colombia……58

Zonificación de la Amenaza por Avenidas Torrenciales en la Quebrada La Parroquia del Municipio de Fusagasugá a partir de la Modelación Bidimensional en el Software ÍBER……73

Optimización de la representación del avance de humedecimiento en riego por goteo superficial a partir del número de sensores y su separación……..90

Evaluación de los servicios ecosistémicos que ofrecen los agroecosistemas aledaños a la microcuenca La Hidráulica como fuente abastecedora del acueducto de Sibundoy Putumayo……..102

Comparación de la huella hídrica para dos sistemas de riego el cultivo de cebolla de bulbo (Allium cepa sp.) en Samacá-Boyacá……..127

Evaluación del Rendimiento de un Cultivo de Microalgas para Tratamiento de Agua Residual Institucional……144

Evaluación de cuatro tipos de biofertilizantes en hortalizas como una alternativa de las buenas prácticas agrícolas (BPA), con productores del municipio de Colón Putumayo Colombia……159

Aplicación de Óxido de Zinc como Nano fertilizante para un suelo de Cultivo de Mora del Municipio de Charta Santander con sistema de Riego automatizado…171

Implementación del sistema de recolección de lluvia horizontal para la mejora de la oferta hídrica en la zona alta de la vereda sabaneta del municipio de San Francisco, Cundinamarca……..184

Degradación de colorante Rojo-G utilizado en el teñido de fibra de alpaca por procesos Fenton y foto-Fenton asistido por cavitación hidrodinámica……...201

Incremento de la fertilidad de suelos agrícolas del Municipio de Piedecuesta en Santander a través de la aplicación de abonos……209

Análisis exploratorio de Estrategias para Reducción de Emisiones de Contaminantes Atmosféricos y Climáticos en Maquinaria Móvil no de Carretera en Colombia……...224

Diseño de un Nano Aerogenerador……..231

Procesos de gobernanza del agua relacionados con proyectos de hidrocarburos en Colombia……253

Análisis numérico mediante IBER del funcionamiento hidráulico de aforadores de garganta larga modificados, para cuencas pequeñas con azolves…….291

El despertar de la conciencia ambiental……..309

Eventos de Inundación, remoción en masa e incendios de cobertura vegetal ocurridos en Bogotá, Distrito Capital y su relación con las condiciones físico-geográficas y climáticas del territorio……...322

Análisis de los efectos del cambio climático en el abastecimiento hídrico a través de modelación de microcuencas hidrográficas: Un estudio de caso en La Bananera, Risaralda – Colombia.……361

Instrumentación de bajo costo para el monitoreo de sistemas de agua potable en un acueducto rural en el área metropolitana de Pereira……...374

PRESENTACIÓN

La Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental – ACODAL, realizó el 65º Congreso Internacional, considerado como el congreso más importante del sector de agua, saneamiento, residuos, ambiente y energías renovables. El evento se llevó a cabo los días 13, 14 y 15 de Julio 2022 en el centro de convenciones ÁGORA de la ciudad de Bogotá.

En esta ocasión se contó con la presencia de representantes de países Aliados como Israel, Corea, Holanda y Estados Unidos e instituciones aliadas como Ministerios, Viceministerios y Comisiones, motivo por el cual los más reconocidos especialistas y empresarios de los sectores académicos, industrial, tecnológico y financiero se darán cita en este evento de calidad excepcional.

A través de espacios bioseguros el Congreso Internacional de ACODAL fué un evento para reencontrarnos y compartir experiencias por medio de una excelente agenda académica, muestra empresarial, tecnológica y comercial con más de 100 stand, la realización de contactos y relación directa con representantes del Gobierno Colombiano, participación en mesas de diálogos sectoriales, asistencia a debates con panelistas internacionales, nuevos conocimientos a través de Workshops y Master Class entre muchas otras oportunidades.

En este documento encontrarán las memorias ISSN de los trabajos técnicos en versión completa que fueron presentados durante el evento, y los cuales son investigaciones de interés que se han realizado por diferentes organizaciones y universidades locales e internacionales en diferentes sectores del agua y medio ambiente las cuales son referentes en el sector.

Esperamos, mediante el presente documento, contribuir al desarrollo de la ingeniería y fortalecimiento de la ingeniería.

ACODAL
ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
65° CONGRESO INTERNACIONAL
Agua, Saneamiento, Ambiente y Energías Renovables
Bogotá - Colombia
Centro de Convenciones Ágora
Julio 13, 14 y 15 de 2022

Tratamiento de Aguas Residuales en la Industria de Acabados Textiles: Aplicabilidad a Mipymes colombianas

Julio Cesar Ramírez Rodriguez[1], [1*] Daniela Moreno Gualtero[2], Juanita Torres Montaño[2], Ana Edilce Sánchez Rojas [3]

[1]Centro de Manufactura en Textil y Cuero-SENA.
[1]Facultad de Ingeniería, Universidad de La Salle.
[3] Facultad de Ingeniería, Universidad Internacional del Trópico Americano-Unitrópico.
*Autor corresponsal: Cundinamarca, Centro de Manufactura en Textil y Cuero, Carrera 30 # 17B-25 Sur, Bogotá D.C. Colombia. Email: jcramirez@unisalle.edu.co

ABSTRACT

The high demand for resources by the different industrial sectors in the world has caused a decrease in the recovery of ecosystems, which has generated an environmental imbalance, especially in the sources of supply. On a global scale, the misuse of water has increased the effects of climate change according to the IPPC in its latest report, so that the most critical governmental actors have been integrated to compensate the effects and future consequences of ecosystemic exploitation. In this sense, the textile industry represents a decisive figure in this panorama, due to the great impacts generated by its production processes, in terms of water quality, air, soil and solid waste management. In particular, on water resources, the quantities and types of chemicals used by the manufacturing industry, in addition to the different types of plastics and microplastics used in their fibers. In Colombia and Latin America, this is a problem with little relevance on the part of the companies; that is, few actually comply with the regulations. Greater regularization of these practices and advances are required not only for large companies, but also for small and medium-sized enterprises (MSMEs). This article will review the status of the wastewater problem and the technological advances used for wastewater treatment.

KeyWords: Economic Development, Industrial Wastewater, Textile Manufacturing MiPymes, Wastewater Treatment, Water Governance.

ACODAL
ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
65° CONGRESO INTERNACIONAL
Agua, Saneamiento, Ambiente y Energías Renovables
Bogotá - Colombia
Centro de Convenciones Ágora
Julio 13, 14 y 15 de 2022

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN LA INDUSTRIA DE ACABADOS TEXTILES: APLICABILIDAD A MIPYMES COLOMBIANAS

RESUMEN

La alta demanda de recursos por parte de los diferentes sectores industriales en el mundo, han ocasionado una disminución en la recuperación de ecosistemas, lo cual, generó un desequilibrio ambiental, en especial, en las fuentes de abastecimiento. A escala global, el mal uso del agua ha incrementado los efectos del cambio climático según referencia el IPPC en su último informe, de manera que, se han integrado los actores gubernamentales más críticos para resarcir los efectos y las futuras consecuencias de la explotación ecosistémica. En este sentido, se señala que la industria textil representa una figura decisiva en este panorama, debido a los grandes impactos que generan sus procesos productivos, en materia de calidad de agua, aire, suelo y gestión de residuos sólidos. En especial, sobre el recurso hídrico, las cantidades y los tipos de químicos que utiliza la industria manufacturera, además de los diferentes tipos de plásticos y micro plásticos que emplean en sus fibras. En Colombia y Latinoamérica es una problemática con poca relevancia por parte de las empresas, es decir, son pocas las que realmente cumplen con la normatividad. Se requiere mayor regularización en estas prácticas y avances para no sólo las grandes empresas, sino también a las Medianas y Pequeñas Empresas (MiPymes). En este artículo se llevará a cabo una revisión sobre el estado de la problemática de aguas residuales y avances tecnológicos utilizados para el tratamiento de aguas residuales.

Palabras clave: Aguas residuales industriales, Contaminantes, Desarrollo Económico, Gestión Ambiental, Gobernanza del Agua, Manufactura de Textiles MiPymes, Tratamiento de Aguas Residuales.

Introducción

Desde la perspectiva de diferentes actores gubernamentales, el cambio climático ha tenido repercusiones devastadoras sobre los recursos hídricos mundiales, reduciendo la capacidad de predecir la disponibilidad de agua y su calidad. Así pues, en el Informe de las Naciones Unidas Sobre el Desarrollo del Agua la UNESCO, (2020) establece que el incremento de la ocurrencia de fenómenos meteorológicos extremos amenaza el desarrollo socioeconómico sostenible y la biodiversidad en todo el mundo, en especial en las fuentes de abastecimiento de agua.
Si bien se han determinado diferentes escenarios de vulnerabilidad y posibles soluciones, cada año se exacerban los desafíos asociados con la gestión sustentable del agua. Por ese motivo, es imperativo seguir y fortalecer los compromisos globales para proteger un futuro sostenible, definidos en la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible y sus 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) dependen en gran medida de la gestión del agua mejorada.

Por su parte, la industria manufacturera representa una figura importante en este panorama según estipula La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), donde proyectan el incremento porcentual de la demanda de agua según el tipo de industria. Si las condiciones actuales continúan, los consumos y demás factores, el sector de manufactura textil, estaría requiriendo 400% más agua para el 2050 con relación a los consumos del año 2000. Este análisis permite señalar que se debe invertir en la gestión de actores gubernamentales que articulen políticas de sostenibilidad, que permitan reducir el impacto de estas industrias. En suma, Zatar, Fatima, & Kim, (2021) detalla que la industria textil genera alrededor de 100 toneladas de efluentes de tintes por año. Efluentes caracterizados con altas concentraciones de carbono orgánico total (TOC), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), color, demanda química de oxígeno (DQO) y sales.

Adicional a ello, las Guías sobre Medio Ambiente, Salud y Seguridad de la Corporación financiera internacional (IFC) establecen que: Las aguas residuales de proceso en la fabricación de textiles suelen ser alcalinas y con un elevadas DBO (de 700 a 2000 m/l) y DQO. Los contaminantes presentes en los efluentes textiles incluyen sólidos en suspensión, aceites minerales (por ejemplo, agentes antiespumantes, grasa, lubricantes de hilatura, agentes surfactantes no biodegradables o de reducida biodegradabilidad [etoxilatos de alkilfenol APEO, etoxilatos de nonilfenol] y otros compuestos orgánicos, incluidos fenoles procedentes de los procesos de acabado en húmedo (por ejemplo, la tintura) y sustancias orgánicas halogenadas derivadas del uso de disolventes durante el blanqueo (IFC, 2007, p.4). Los cuales, afectan ecosistemas, generan alteraciones de las características biológicas de una cuenca, problemas de salud pública, y en general, pérdida de biodiversidad.

Justamente los impactos ambientales ocasionados por la industria textil se han incrementado en los últimos años a raíz de diferentes fenómenos, sin embargo, el de mayor impacto es el denominado fast fashion, este consiste en la fabricación de indumentaria masiva que se vende a bajo precio, para que la gente pueda comprar ropa nueva con mayor frecuencia, según cita la Universidad de Cambridge. Del mismo modo la Enviromental Protection Agency (EPA) publicó un estudio en el que afirman que el fenómeno del fast fashion contribuye a un 10% de las emisiones mundiales de CO_2 al año. En este sentido, se busca contextualizar esta problemática con los impactos que tiene la industria en Colombia, para tal fin, se resalta el estudio realizado por López, (2018) en cuyo informe determinó una huella hídrica azul (26.714.302 m^3 de agua) en los procesos de manufactura , una demanda Hídrica , Uso y Disposición final por el valor de 58.067.712 m^3, una huella hídrica verde de 45.583.761 m^3/Ton y una huella hídrica gris de 118 m^3; resaltando mayor representatividad en la Ciudad de Medellín en comparación con ciudades como Cali y Bogotá con registros de 16m^3 y 86 m^3 respectivamente.

Por otro lado, de acuerdo con el informe Riesgos Ambientales y Sociales en el Sector Textil realizado por La Asociación Bancaria y de Entidades Financieras de Colombia, subrayan como principales impactos la contaminación del recurso agua debido a sus vertimientos con altas cargas contaminantes. Asobancaria, (2019) menciona que “la principal fuente de aguas residuales es el acabado de tejidos, que implica el tratamiento con baños químicos y de licor, y frecuentes rondas de lavado, aclarado y secado” (p.18). Del mismo modo, la Cámara de Comercio de Bogotá-CCB, Corporación Ambiental Empresarial -CAE y Acercar Industria indican que los procesos de la etapa de acabado de telas y prendas tienen una connotación de medio a alto impacto negativo. Precisamente, el Registro Único Ambiental manufacturero señalan que la tejeduría y el acabado de productos textiles en el departamento de Antioquia generan vertimientos por el valor de 2.7 y 1.6 millones de metros cúbicos, siendo para la ciudad de Bogotá el sector de acabados el mayor generador de vertimientos con 1,5 millones de metros cúbicos, mientras que la tejeduría de productos textiles es la tercera con 1 millón de metros cúbicos.

Por esta razón, es fundamental la implementación del tratamiento posterior de los efluentes textiles y su reutilización en fines pertinentes. Para Almansba, y otros, (2021) la mayoría de los contaminantes orgánicos en cuerpos de aguas residuales provenientes de vertimientos de la industria textil tienen una baja biodegradabilidad a tratamientos convencionales como la coagulación, filtración o la adsorción. Por lo que se han implementado alternativas de tratamiento entre los cuales se destacan procesos de oxidación avanzada (fotocatálisis), procesos de mineralización, y degradación foto catalítica con el uso de energía luminosa para transformar contaminantes complejos en

materiales orgánicos simples como CO_2 y H_2O. En ese orden de ideas, es de vital importancia considerar la incidencia que tienen las MiPymes nacionales en el medio ambiente, particularmente en el recurso agua. Por ende, la finalidad de este artículo es documentar la información técnica que permita profundizar el conocimiento sobre las alternativas para el uso y tratamiento de las aguas residuales, perspectivas para su aplicabilidad en MiPymes colombianas del sector de acabados de la industria textil.

El análisis del fundamento tecnológico que sustenta este documento es de gran utilidad, dado que presenta las bases teóricas que pueden ser empleadas en el desarrollo de nuevos productos. Para esto, se consultaron bases de datos, identificando los resultados más relevantes de los temas que se han planteado, y revisión de publicaciones en materia nacional e internacional.

Marco teórico

Para el Centro de estudios económicos ANIF, (2021) en Colombia “Las Mipymes representan más del 99% de las empresas del país, generan aproximadamente 79% del empleo y aportan al 40% al Producto Interno Bruto (PIB)” (p.1). Así mismo, el Registro Único Empresarial y Social (Rues) menciona que, Colombia cuenta con 35.111 empresas de confecciones, 215 de hilados y 7.294 de textil, de las cuales aproximadamente el 99.7% son micro, pequeños y medianos negocios que representan el motor que impulsa este sector industrial, adicional a ello, se debe resaltar a la industria como principal empleador de mujeres dentro del sector manufacturero (Castellanos, 2021).En especial, la Cámara de Comercio de Medellín señala que hay total de 14.920 empresas en actividades relacionadas con el Clúster Textil /Confección, Diseño y Moda de esas 13.582 son microempresas, 1.260 son pymes y 78 son grandes empresas (El tiempo, 2018).

A lo correspondiente a la Clasificación Industrial Internacional Uniforme (CIIU), según DANE, (2021) a la división 13 de las industrias manufacturares se encuentra la fabricación de productos textiles que incluye a su vez las siguientes actividades presentadas en la **Tabla 1.**

Tabla 1. Actividades económicas que hacen parte del sector textil

División 13	Fabricación de productos textiles
131. Preparación, hilatura, tejeduría y acabado de productos textiles.	1311. Preparación e hilatura de fibras textiles 1312.Tejeduría de productos textiles 1313.Acabado de productos textiles
139.Fabricación de otros productos textiles	1391. Fabricación de tejidos de punto y ganchillo 1392. Confección de artículos con materiales textiles, excepto prendas de vestir. 1393. Fabricación de tapetes y alfombras para pisos. 1394. Fabricación de cuerdas, cordeles, cables, bramantes y redes. 1399. Fabricación de otros artículos textiles.

Fuente: *tomado de (DANE, 2021).*

Particularmente, esté articulo resalta a la clase de acabados de productos textiles el cual consta de “Un conjunto de procesos que mejoran la apariencia, durabilidad o capacidad de servicio de los tejidos grises y crudos, convirtiéndolos en tejidos acabados. La mayoría de estos procesos son intensivos en agua y requieren distintas sustancias químicas” (IFC, 2007, como se citó en Bocanegra, 2019, p.14). Es por ello, que se describen de forma generalizada de acuerdo con CEPIS, 1995 citado por Asobancaria, 2019 los procesos ejecutados en el sector de acabados. Comenzando con el desencolado (eliminación de impurezas), se continua con el descrude el cual emplea solventes como percloroetileno para mejorar la limpieza del tejido, posteriormente se debe realizar un mercerizado es decir el hinchamiento de las fibras mediante la aplicación de soluciones de álcalis cáusticos en frio, cuyo principal objetivo está el de otorgar propiedades de resistencia a la tensión, afinidad del tinte y la resistencia a la abrasión.

Adicionalmente, se debe realizar un blanqueo cuyos reactivos más habituales son el peróxido de hidrógeno, el hipoclorito de sodio, el clorito sódico y el gas de dióxido de azufre. Por consiguiente, se realiza el teñido, es decir la fijación de colorantes en las fibras textiles con el uso de tintes que abarcan a los ácidos sulfónicos, tintes azoicos, bases orgánicas, sales de sodio, compuestos obtenidos del antraceno, tintes metalizados, tintes reactivos y compuestos de azufre (IFC, 2007). Entre otras consideraciones finales adicionales al uso de tintes, acorde a la Fundación Suiza para el Desarrollo Sostenible

en América Latina FUNDES, (2001) se utilizan sustancias auxiliares para disolver colorantes, evitar su degradación por el calor, lograr un remojo completo de los textiles, obtener uniformidad e incrementar la velocidad de absorción.

Otro aspecto de importancia es que recientemente la industria textil ha venido incursionando en lograr una funcionalización del textil a partir de la modificación física y química de las fibras textiles, que le otorgan propiedades adicionales como impermeabilidad, resistencia al fuego, autolimpieza foto catalítica, disminución de la proliferación microbiana, la protección UV, propiedades antiestáticas entre otras, que de acuerdo al DAMA, (2004) lo anterior se logra mediante la aplicación de baños de diferentes sustancias (ver **Tabla 2** del Anexo) presentes en soluciones acuosas. En síntesis, en la siguiente figura se esquematizan los procesos de acabados de tejidos planos con sus respectivas entradas y salidas

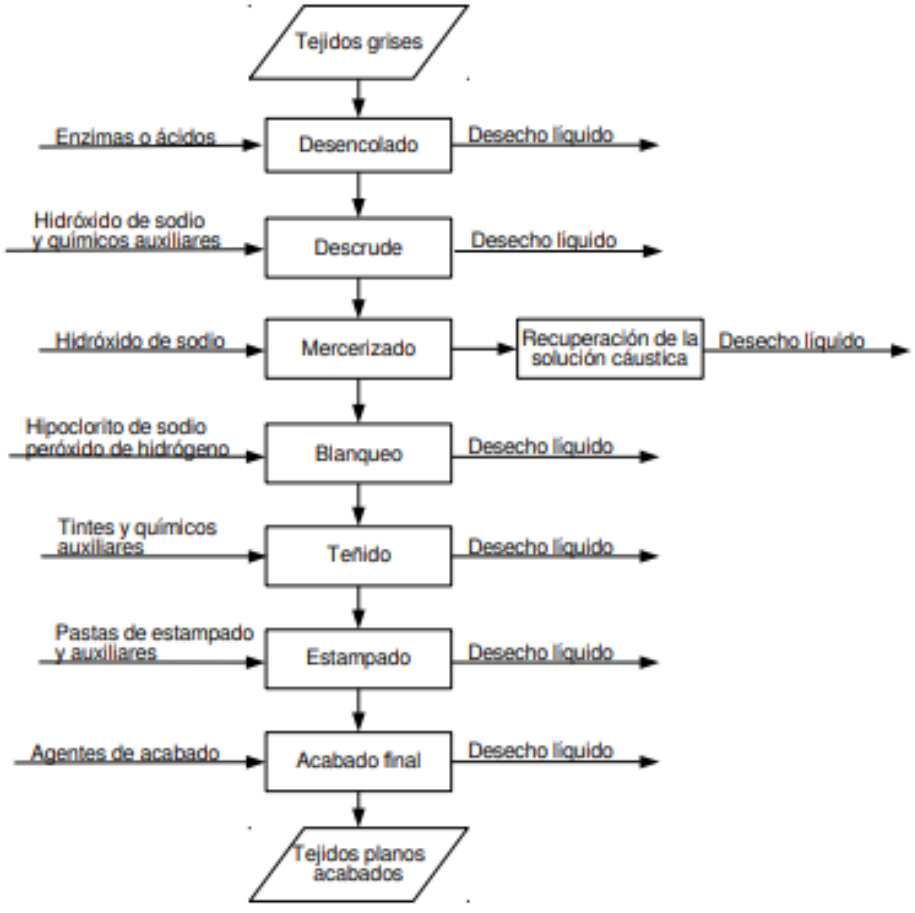


Figura 1. Acabados de tejidos planos. **Fuente:** (CEPIS 1995. Citado por DAMA, 2004).

Cabe señalar que la legislación colombiana en el Decreto 1076 de 2015 incluye entre los residuos peligrosos de la industria textil los desechos resultantes de:

- ✓ La producción, preparación y utilización de tintas, colorantes, pigmentos, pinturas, lacas o barnices.
- ✓ La producción, la preparación y la utilización de disolventes orgánicos.
- ✓ Mezclas y emulsiones de desechos de aceite y agua o de hidrocarburos y agua.
- ✓ La producción, la preparación y la utilización de biocidas y productos fitofarmacéuticos.
- ✓ La producción, preparación y utilización de resinas, látex, plastificantes o colas y adhesivos
- ✓ Constituyentes solventes orgánicos halogenados (Decreto 1076, 2015, p.296).

Precisamente, IDEAM, 2019 indica el amplio uso de sustancias químicas contaminantes en cada uno de los procesos que involucran al sector de acabados de tejidos textiles, exponiendo una variación significativa entre los años 2012 y 2017 de las cantidades de residuos peligrosos generadas por el sector textil. Justamente, en el estudio nacional del agua 2018 realizado por el IDEAM, se indica que en la ciudad de Bogotá el sector de acabados es el primer generador de vertimientos con 1.5 millones de metros cúbicos.

Observando la realidad ambiental del sector de acabados y que entre otras cosas coincide precisamente según DAMA, (2004) con la sección de la cadena que más valor le agrega a los productos y que por tanto más influye en la competitividad. Competitividad que se encuentra en función del mejoramiento de la gestión ambiental de las MiPymes, siendo fundamental, la valoración de indicadores de desempeño ambiental en particular en el aspecto agua, como lo son la captación total de agua por fuentes, porcentaje y volumen total de agua reciclada o reutilizada y la determinación del vertimiento total de aguas residuales según su naturaleza y destino.

En consecuencia, resulta necesario la adopción de buenas prácticas ambientales orientadas primordialmente a la prevención, implicando inversiones en la implementación de sistemas de tratamiento que debido a la variedad de sustancias químicas y procesos, se requerirán del uso de una o más unidades de tratamiento. La clasificación de las técnicas empleadas de tratamiento de aguas residuales por origen y el pretratamiento de corrientes de aguas residuales son las siguientes:

- ✓ Corrientes de carga elevada (DQO) que contengan compuestos no biodegradables mediante la oxidación química.

- ✓ Reducción de metales pesados empleando la precipitación química, la coagulación y la floculación.
- ✓ El tratamiento de corrientes altamente coloreadas o con elevados niveles de TDS empleando la ósmosis inversa. (IFC, 2007, p.8).

Así mismo, las fases en el tratamiento de aguas residuales de la industria textil suelen incluir: filtros de grasas, desespumadores o separadores de agua/aceite para separar los sólidos flotantes; filtración por separación de sólidos filtrables; ecualización de flujo y carga; sedimentación para la reducción de sólidos en suspensión utilizando clarificadores; tratamiento biológico, normalmente aeróbico, para reducir las sustancias orgánicas solubles (DOB); eliminación de nutrientes biológicos para la reducción de nitrógeno y fósforo.

En las Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad para la fabricación de textiles resaltan que: Es posible que se requieran controles de ingeniería adicionales para la eliminación avanzada de metales empleando filtros de membrana y otras técnicas de tratamiento físico/químico, para la eliminación de compuestos orgánicos recalcitrantes, plaguicidas residuales y sustancias orgánicas halogenadas empleando carbón activo u oxidación química avanzada, la eliminación de color residual mediante la adsorción u oxidación química, la reducción de la toxicidad en los efluentes empleando la tecnología adecuada (como por ejemplo ósmosis inversa, intercambio iónico, carbón activo), el confinamiento y la neutralización de olores molestos(IFC, 2007, p.8). Como se evidencia, se requiere de un esfuerzo y de la implementación de instrumentos financieros para que las MiPymes de la industria textil prevengan la generación de impactos negativos en el recurso agua, y consigo mejoren sus niveles de competitividad.

En resumen, estos conceptos aportan criterios y perspectivas para desarrollar la investigación contextualizada en los diferentes tratamientos de aguas residuales del sector de acabados textil, usos, características, y su impacto en el desempeño ambiental de MiPymes colombianas.

Método

Según Barbosa (2013), para la construcción del marco teórico se realiza a partir de dos fases, la primera consiste en la recolección de la información bibliográfica y la segunda, analiza los documentos obtenidos en la fase anterior. La fase heurística (1) se fundamenta en la selección de información de temas relacionados al objeto de estudio, además, implica la construcción y definición de los criterios de búsqueda, de inclusión de fuentes de consulta y todos los demás conceptos que se consideren que limiten o enriquezcan el trabajo investigativo.

Para ejecutar la búsqueda se utilizaron los operadores booleanos, (AND, NOT, OR, XOR), Barbosa referencia que éstos son términos o símbolos que se utilizan para darle a la búsqueda un orden lógico, de forma que se localizan los registros que contienen los términos correspondientes a uno de los campos especificados o en todos los campos. El operador AND (Y), indica que las palabras que anteceden y siguen al operador deben encontrarse en el resultado de la búsqueda. El NOT, muestra que la palabra clave anterior al operador deberá aparecer, pero no la posterior. Por su parte, el OR (O): Indica que cumple con que solo una de las palabras esté presente. En la mayoría de las herramientas de búsqueda puede reemplazarse por un espacio en blanco. Finalmente, el XOR: especifica que, de ambas palabras clave, sólo debe aparecer una (Chacón, Barbosa, & Rodríguez, 2013).Paralelamente, la segunda fase, es decir la hermenéutica o de análisis, emplea los hallazgos de la fase anterior y su finalidad es dar forma al documento para resumir los referentes, dando un orden coherente y ampliando de la información sobre el tema de este estudio. Igualmente, para el análisis se lleva a cabo, partiendo de los principios de la Revisión y Análisis Documental (RAD) propuesto por Barbosa (2013) en el artículo: “Revisión y análisis documental para estado del arte: una propuesta metodológica desde el contexto de la sistematización de experiencias educativas del año 2013”.

Resultados y Discusión

Los resultados de la investigación permitieron en un principio identificar del informe de Riesgos Ambientales del sector Textil las concentraciones promedio de distintos parámetros de calidad del agua provenientes de los diferentes procesos de la industria textil (ver **Tabla 3**), estos advierten sobre el incumplimiento de los valores límites máximos permisibles estipulados por el Decreto 0631 de 2015 para los vertimientos puntuales de agua superficial y a los sistemas de alcantarillado público.

Tabla 3. Parámetros promedio de las aguas residuales de la industria textil

Procesos	DBO (mg/l)	DQO (mg/l)	SST (mg/l)	Aceites y grasas (mg/l)	Fenoles (µg/l)	Cromo (µg/l)	Sulfu-ros (µg/l)	Color (APHA)
Descrude de lana	2.270	7.030	3.310	580	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Acabado de lana	170	590	60	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Procesos poco intensivos en agua (hilado, tejido, engomado, punzonado)	293	692	185	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Teñido	170	1.908	499	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Acabado de tejidos planos								
Simple	270	900	60	70	50	40	70	800
Complejo	350	1.060	110	45	55	110	100	N.D.
Complejo + desengomado	420	1.240	155	70	145	1.100	N.D.	N.D.
Acabado de tejidos de punto								
Simple	210	870	55	85	110	80	22	400
Complejo	270	790	60	50	100	80	150	750
Acabado de calcetines	320	1.370	80	100	60	80	560	490
Acabado de alfombras	180	1.190	65	20	130	30	180	490
Acabado de hilos	180	680	40	20	170	100	200	570
Límite admisible (Resolución 631 de 2015)	**200**	**400**	**50**	**20**	**200**	**500**	**1000**	**N.D.**

Fuente: U.S EPA, 1996, Savin & Butnaru, 2008 y Resolución 631 de 2015, citado por (DAMA, 2004).

De la tabla anterior se aprecia, mayoritariamente el incumplimiento de parámetros como DBO, DQO, SST, grasas y aceites y particularmente el metal cromo para el proceso correspondiente a complejo más desengomado. Adicional a ello, FUNDES, (2001) señala como características de los residuos líquidos generados, altas cargas orgánicas, tonos contaminantes que provienen de las secciones de tintorería estampado, acabados y planta de agua. Igualmente, los procesos que aportan carga contaminante son:

- Descrudes, con vertimientos de detergentes, emulsionantes, secuestrantes, antiespumantes, solventes, suavizantes y productos engomantes.

- Teñidos, con vertimientos de colorantes, igualadores, dispersantes, antiespumantes, estabilizadores de pH, secuestrante de dureza.
- Blanqueo, con vertimientos de soda, solventes, blanqueadores ópticos, emulsionantes, peróxidos y ácidos.
- Lavados, con vertimientos de detergentes y de colorantes hidrolizados.
-Estampados, con vertimiento de colorantes y pigmentos remanentes y productos auxiliares como ácidos, estabilizadores, álcalis, humectantes, resinas y ligantes.
- Acabados, con aporte de suavizantes, resinas, catalizadores, impermeabilizantes, humectantes, antideslizantes (p.23).

A lo que respecta al uso del recurso hídrico, la U.S. EPA, 1996 citado por DAMA, 2004 resalta mayores requerimientos de agua al interior del proceso de acabado de lana con un valor máximo de 667.2 L/kg continuando con un valor de 557. l L/kg correspondiente al proceso de acabados de hilos en tejidos de punto, y finalmente, en el proceso complejo + desengomado (Acabado de tejidos planos) se evidencia la demanda de agua de 507.9 l/kg.

Adicional a lo anterior, el informe de sostenibilidad del sector Sistema Moda del año 2012 realizado por la Cámara de la Cadena Algodón, Fibras, Textil y Confecciones (ANDI), la Asociación Colombiana de Industriales del Calzado, el Cuero y sus Manufacturas (ACICAM) y el Programa de Transformación Productiva (PTP) indican como resultado de la evaluación de indicadores de desempeño ambiental particularmente del recurso agua, un consumo de un 84% para la sección operativa frente a un 16% para consumo administrativo. Así mismo, un consumo anual promedio de agua para empresas del sector Textil y Confecciones de 761.965 m^3 que representan como referencia aproximadamente un 19% de la capacidad de agua que puede contener el embalse de La regadera (4 millones de metros cúbicos de capacidad según la Secretaría Distrital de Ambiente SDA, (2022)) localizado en las estribaciones del páramo del Sumapaz, Cundinamarca. En promedio el agua reciclada o reutilizada corresponde a un 13.6 % en empresas textiles y Confecciones y de un 0,07% para cuero, calzado y Marroquinería, a su vez, la siguiente figura señala que el 25 % de las empresas textiles no cuenta con un tratamiento o gestión de sus aguas residuales. De acuerdo con DANE, (2020) el volumen de agua utilizado por la industria manufacturera fue de 278.1 millones de metros cúbicos provenientes en un 60.7 % de agua superficial, 21.1 % de agua suministrada por empresas de acueducto, 15.1% agua subterránea, y un 3.0 % (agua lluvia, agua de mar y agua en carro tanque) de los cuales la actividad industrial de textiles, confección, calzado y pieles registran un consumo de 11.7 millones de metros cúbicos.

Igualmente, del total de establecimientos pertenecientes al dominio de actividades industriales *textil, confección, calzado y pieles* que suministraron información (1.172 establecimientos) a la Encuesta Ambiental Industrial (EAI) del año 2020 se menciona que 309 (26.4%) de ellos cuenta con un programa de uso eficiente y ahorro de agua cuya variación porcentual con el año 2019 es del 2.8% (23.6%). Por otro lado, del agua residual generada (9.593.491m^3), es tratada y vertida unos 6.950.150 m^3 por parte del mismo establecimiento y tratada y vertida por terceros 831.522 m^3, de manera que para el año 2020 el porcentaje de agua residual tratada correspondió a un 81.81% (DANE, 2020).

Desde este panorama se resalta por parte del sector textil, confección, calzado y pieles una disminución de 25.6 % en el gasto en protección y conservación de categorías ambientales como la protección del suelo, aguas subterráneas y superficiales y la gestión de recursos energéticos, sin embargo, se indica un aumento en el gasto de un 6.3 % entre los periodos de 2019/2020 concretamente en la gestión de las aguas residuales. Si bien se evidencia un aumento en el gasto en la gestión de las aguas residuales generadas por el sector textil, se resalta que aproximadamente un 20 % de estas no cuentan con ningún tratamiento, recordando que las cifras presentadas con anterioridad incluyen a grandes empresas lo cual supone un panorama más crítico para las micro pequeñas y medianas empresas (MiPymes).

Justamente, CEPAL, (2003) señala que: Las Pyme corresponden al sector de las empresas más vulnerables en términos de su capacidad para enfrentar la creciente presión social, regulatoria y de fiscalización en materia ambiental, ya sea por la información escasa, o porque no cuentan con políticas definidas que les permitan desarrollar estrategias efectivas para la adecuación de sus procesos en función de la prevención de impactos ambientales (p.7). En suma, la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) en su informe indica que: Las empresas no registradas representan cerca del 50%, dependiendo del sector analizado. Sin embargo, se considera que la misma informalidad constituye una barrera a la demanda real de bienes y servicios ambientales. Especialmente en sectores como el de curtiembres se evidencia un alto nivel de informalidad, lo que da lugar a que se encuentren registradas únicamente 251 empresas (tan sólo en la ciudad de Bogotá se estima que hay cerca de 300 empresas en funcionamiento) (p.28).

A lo anterior debe añadírsele la crisis económica que ha enfrentado el sector textil en los últimos años por diversas causas según Galvis, (2022) como la importación del mercado asiático, el contrabando técnico, prácticas como el dumping (vender por debajo del costo de producción) entre otras. Para la empresa de consultoría IARA Consulting Group citado

por El espectador, 2018 el error principal de las compañías es que no conocen los factores que determinan su desempeño y por eso fracasan. Por otro lado, Confecámaras menciona que la tasa de sobrevivencia de nuevos emprendimientos es del 34% en los primeros cinco años de actividad, es decir, que de 100 empresas que se crean solo 34 sobreviven (El tiempo, 2018).

Por consiguiente, se hace relevante la implementación de iniciativas de mejora de las MiPymes en pro del fortalecimiento económico y mejora de su desempeño ambiental. Por mencionar entre algunas iniciativas se encuentra la “Política Nacional de Producción más limpia” del año 1997, y en cuyo enfoque promueve fundamentalmente la prevención y la incorporación de "mejores prácticas ambientales” en cada una de las fases del ciclo de vida de los productos (Republica de Colombia, 1997). Como resultado se cuenta con las Guías Ambientales: Buenas Prácticas de Producción *Más Limpia* para el sector PYME en Colombia. Específicamente, se cuenta con la Guía de Buenas Prácticas para el sector textil la cual establece entre sus objetivos contribuir a la sostenibilidad ambiental del sector. Entre otras estrategias que contribuyen y orientan a la mejora continua del sector se encuentra planificar niveles de stock adecuados, generalmente cosechas completas y de un mismo lugar o procedencia, para el caso de fibras naturales como el algodón, planificar con los proveedores la sustitución de materias primas de origen químico utilizadas en los procesos de acabados que incluyen los pretratamientos y tratamientos (ver **Tabla 3** del anexo).

Se denotó que la aplicación de la metodología de búsqueda propuesta por Chacón, Barbosa, & Rodríguez, (2013) permitió seleccionar los artículos de mayor relevancia para la investigación, entorno al tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria textil. De manera reiterada se encontró que procesos convencionales como la coagulación es eficiente para la remoción de coloides y sólidos suspendidos; por ejemplo, Jorfi, y otros, (2017) reportan que este tipo de contaminantes representan alrededor de 50 % de la DQO total de un efluente textil. De ahí que, se emplee generalmente como etapa de pretratamiento, siendo necesario efectuar un tratamiento posterior con el objeto de eliminar los contaminantes remanentes y dar cumplimiento a la normatividad en materia ambiental.

Si bien la coagulación es considerada como un método de tratamiento convencional Daneshvar, Oladegaragoze, & Djafarzadeh, (2006) señalan como principal problema de la coagulación la sensibilidad de los coagulantes a condiciones de pH y temperatura, y que estos suelen ser costosos. En consecuencia, se ha comenzado a utilizar la electricidad como medio para generarlos con la ayuda de electrodos de hierro o aluminio como medios conductores, esta última tecnología tiene las ventajas de un mejor control

de reactivos, requieren equipos simples, se generan un menor volumen de lodos, asimismo, no se requiere de la adición de reactivos químicos adicionales (p.2).De hecho, Ospina & Betancur, (2016) evaluaron la viabilidad tecnológica del proceso acoplado de electro-Coagulación y electro-Oxidación con una optimización del sistema mediante el diseño de experimentos de superficie de respuesta Box-Behnken (DBB), del cual obtuvieron en un tiempo de 30 minutos una reducción del 80.85 % para el parámetro de la DQO y de 100 % para el color, con un consumo energético de 15.96 kWh/m^3 y una producción de lodos de 0.882 kg/m^3 con 20% de humedad.

Por otro lado, Gilpavas, Arbeláez, Medina, & Gomez, (2018) al evaluar el tratamiento secuencial coagulación química (CQ) seguida de procesos avanzados de oxidación (PAO) Fenton (H_2O/ Fe^{2+}) o foto-Fenton (UV/H_2O_2/ Fe^{2+}) intensificados con radiación de ondas de ultrasonido (US) de baja frecuencia, establecieron como condiciones óptimas del proceso $US/H_2O_2/Fe^{2+}$ 1 mM de Fe^{2+}, 14 mM de H_2O_2 y pH 3. En estas condiciones de operación el proceso de CQ acoplado con el proceso $US/H_2O_2/Fe^{2+}$ removió alrededor de 82 % de la DQO en tanto que al acoplarlo con el proceso $US/UV/H_2O_2/Fe^{2+}$ alcanzó 95 % de eliminación en 90 min de reacción. Del mismo modo, ejecutando el diseño experimental de metodología de superficie Box -behmken (MSR-DBB) se estableció el efecto de cada una de las variables de operación sobre la degradación de la DQO, resultando estadísticamente significativas. Valores de pH mayores que 3 causaron una reducción de la [Fe^{2+}] en la solución, aun en presencia de cavitación acústica, disminuyendo la eficiencia del proceso. Incrementos tanto en la [Fe^{2+}] como en la [H_2O_2] promovieron un aumento en la eficiencia del proceso evaluado.

Por su parte, Almansba, y otros, (2021) implementan en su estudio tecnologías como la fotocatálisis heterogénea con TiO_2 bajo irradiación de luz ultravioleta, la cual permite no solo la degradación de moléculas objetivo, sino que también la mineralización de subproductos. Nasr, Eid, Habchi, Miele, & Bechelany, (2018) resaltan como ventajas del catalizador de TiO_2 baja toxicidad, bajo costo, disponibilidad comercial y estabilidad fotoquímica, sin embargo, se presentan deficiencias con relación a la penetración de la luz en los reactores foto catalíticos qué no permiten el contacto entre la luz, el catalizador y el contaminante. De manera que, como alternativa los autores requirieron al uso de un tejido luminoso (combinación de fibras textiles de poliéster (fibras Trévira CS™) yalma de fibras ópticas deresinade polimetilmetacrilatoe 480 µm de diámetro medio recubiertas con 10 µm de espesor del polímero fluorado), el cual facilitó la intensificación de la fotocatálisis heterogénea de TiO_2 bajo irradiación UVA-LED, y que por consiguiente logro procesos de alto rendimiento.

Conclusiones y recomendaciones

Los resultados de la investigación permitieron identificar que los avances tecnológicos en materia de tratamiento de aguas residuales han implementado alternativas de tratamiento entre los cuales se destacan procesos combinados como la electro-Coagulación y electro-Oxidación, oxidación avanzada (fotocatálisis), procesos de mineralización y degradación foto catalítica con el uso de energía luminosa que permitan transformar contaminantes complejos en materiales orgánicos simples como CO_2 y H_2O. De los cuales, se identificó altos rendimientos en la eliminación por ejemplo de parámetros como la DQO, DBO, color, así como, de compuestos farmacéuticos, flumequina (antibiótico) y cetirizina (antihistamínico), sin embargo, se hace hincapié que estos no son los únicos parámetros que se encuentran en las aguas residuales provenientes de la industria textil. Por lo cual, es fundamental la caracterización previa de los efluentes de cada empresa en particular, identificando consigo la mayor cantidad de parámetros que pudiesen ocasionar afectaciones no solo al medio ambiente, sino también en la salud humana.

En este contexto se resalta que las micro, pequeñas, y medianas empresa poseen problemáticas entorno a infraestructura física y acompañamiento integral en el diseño e implementación de prácticas y tecnologías de tratamiento. La misma Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) reconoce que las Pyme corresponden al sector de las empresas más vulnerables en términos de su capacidad para enfrentar la creciente presión social, regulatoria y de fiscalización en materia ambiental, ya sea por la información escasa, o porque no cuentan con políticas definidas que les permitan desarrollar estrategias efectivas para la adecuación de sus procesos en función de la prevención de impactos ambientales.

Necesidades de bienes y servicios ambientales que se encrudecen a raíz de la informalidad de muchas empresas, y que por ende no se les realiza ningún tipo de control por parte de autoridades ambientales, las cuales ocasiona daños irreversibles en su entorno. Aunque se resalta existen políticas como el Sistema Nacional de apoyo a Micro, Pequeñas y mediana empresa estipulado en el año 2016 por el MINCIT, donde se establece que las MiPymes tienen una gran responsabilidad en el cumplimiento de los Objetivos de Colombia dentro de la “Agenda 2030 para el desarrollo sostenible” de las Naciones Unidas. Asimismo, en conjunto La Unión europea, MINCIT y la Cámara de Comercio de Bogotá promueven la sostenibilidad empresarial desde el año 2019 desarrollando el proyecto producción y Comercio Sostenible, el cual responde a las necesidades de las MiPymes en materia de productividad y competitividad, permitiéndoles su transición a modelos de negocios social, ambiental y económicamente sostenibles. Existe igualmente apoyo de agremiaciones como el Sena, Inexmoda, la

ANDI, ProColombia, entre otras, donde se promueven la financiación de proyectos científicos, tecnológicos y de innovación.

Finalmente, con base en lo expuesto en el presente documento se evidencia la falta de acompañamiento e identificación de las necesidades reales del sector acordes al mercado y desafíos en materia ambiental y que en consecuencia, resulta necesario la adopción de buenas prácticas ambientales, orientadas primordialmente a la prevención, implicando inversiones en la implementación de sistemas de tratamiento que debido a la variedad de sustancias químicas y procesos se requerirán del uso de una o más unidades de tratamiento.

Referencias

DAMA. (2004). *Guia Ambiental para el sector textil.* Bogotá, D.C.,disponible en : https://bibliotecadigital.ccb.org.co/handle/11520/20564

Almansba, A., Kane, A., Nasrallah, N., Maachi, R., Lamaa, L., Peruchon, L., . . . Assadi, A. A. (2021). Innovative photocatalytic luminous textiles optimized towards water treatment: Performance evaluation of photoreactors. Revista de IngenierÍa química. **416**,1-13. doi: https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129195

ANDI. (2012). *Informe de Sostenibilidad -Sistema Moda.* Bogotá, disponible en:https://www.colombiaproductiva.com/ptp-capacita/publicaciones/sectoriales/publicaciones-sistema-moda/informe-de-sostenibilidad-sistema-moda-2012

ANIF. (2021). *Retos y oportunidades de las Pymes,* disponible en : https://www.anif.com.co/comentarios-economicos-del-dia/retos-y-oportunidades-de-las-pymes/

Asobancaria. (2019). *Riesgos Ambientales y Sociales en el Sector Textil ,* disponible en :Riesgos Ambientales y Sociales Sector Textil.pdf (asobancaria.com)

Castellanos, D. S. (20 de Septiembre de 2021). *Sector textil colombiano, de los años dorados al declive que expuso la pandemia*. Obtenido de https://www.bloomberglinea.com/2021/09/20/sector-textil-colombiano-de-los-anos-dorados-al-declive-que-expuso-la-pandemia/

CEPAL. (2003). *Necesidades de bienes y servicios ambientales de las pymes en Colombia:identificación y diagnóstico.* 70pp, disponible en: https://www.cepal.org/es/publicaciones/5767-necesidades-bienes-servicios-ambientales-pyme-colombia-identificacion-diagnostico

Chacón, J. W., Barbosa, J. C., & Rodríguez, M. (02 de 05 de 2013). Revisión y análisis

documental para estado del arte: una propuesta metdológica desde el contexto de sistematizacion de esperiencias educativas. *Investigación bibliotecológica, 27*, 83-105.

DANE. (2020). *Encuesta Ambiental Industrial (EAI),* disponible en *:* Encuesta ambiental industrial (EAI) Históricos (dane.gov.co)

DANE. (2021). *Clasificación Industrial Internacional Uniforme de todas las actividades económicas : Revisión 4 adaptada para Colombia,* disponible en : https://www.dane.gov.co/index.php/sistema-estadistico-nacional-sen/normas-y-estandares/nomenclaturas-y-clasificaciones/clasificaciones/clasificacion-industrial-internacional-uniforme-de-todas-las-actividades-economicas-ciiu

Daneshvar, N., Oladegaragoze, A., & Djafarzadeh, N. (2006). Decolorization of basic dye solutions by electrocoagulation: An investigation of the effect of operational parameters. *Hazardous Materials*.**129**(1-3),116-122. doi: https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.08.033

Decreto 1076. (2015). Decreto único reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Director of Publishing for Save The Water. (2019). *World Water Demand Will Increase 55% by 2050.* Obtenido de https://savethewater.org/water-demand-to-increase-55-globally-by-2050/

El espectador. (29 de Octubre de 2018). ¿Por qué el 70% de las empresas en Colombia fracasan en los primeros cinco años? , disponible en:¿Por qué el 70% de las empresas en Colombia fracasan en los primeros cinco años? | EL ESPECTADOR

El tiempo. (23 de enero de 2018). *Colombiatex 2018 pinta cifras positivas para el sector textil*. Obtenido de https://www.eltiempo.com/colombia/medellin/colombiatex-2018-pinta-cifras-positivas-para-el-sector-textil-174308

El tiempo. (13 de Diciembre de 2018). En alza, el índice de supervivencia de las empresas en el país, disponible en :La tasa de supervivencia de empresas en Colombia - Empresas - Economía - ELTIEMPO.COM

FUNDES. (2001). *Guía de Buenas Prácticas para el Sector Textiles,*obtenido de *:* GUIAtextiles.JCH.doc (justiciaambientalcolombia.org)

Galvis, M. C. (2022). La crisis del sector textil , obtenido de :La crisis del sector textil Análisis | Opinión | Portafolio

Gilpavas, E., Arbeláez, P., Medina, J., & Gomez, C. (2018). Tratamiento de aguas residuales de la industria textil mediante coagulación química acoplada a procesos Fenton intensificados con ultrasonido de baja frecuencia. *Revista internacional de Contaminación Ambiental*.**34**(1),157-167.doi:

https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.01.14

IFC. (2007). *Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad para la fabricación de textiles.* obtenido de : Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad para la fabricación de textiles (ifc.org)

Jorfi, S., Barzegar, G., Ahmadi, M., Darvishi, R., Soltani, C., Haghighifard, N. a., . . . Abtahi, M. (2017). Enhanced coagulation-photocatalytic treatment of Acid red 73 dye and real textile wastewater using UVA/Synthesized MgO nanoparticles. *Science direct*.**177,**(11-118), obtenido de: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.04.005

López, A. S. (2018). *Huella Ecológica del sector Textil-Confección en Colombia .* Obtenido de https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/52684/SENTENAM-TESIS.pdf?sequence=2

Nasr, M., Eid, C., Habchi, R., Miele, P., & Bechelany, M. (2018). Recent Progress on Titanium Dioxide Nanomaterials for Photocatalytic Applications. *ChemSusChem*. doi: 10.1002/cssc.201800874

Ospina, N. H., & Betancur, S. R. (2016). Tratamiento de aguas residuales del sector textil mediante proceso acoplado electro-coagulación-electro-oxidación.Medellin, obtenido de :Tratamiento de aguas residuales del sector textil mediante proceso acoplado electro-coagulación-electro-oxidación (eafit.edu.co)

Republica de Colombia. (1997). *Politica Nacional de Producción más Limpia.* Bogotá. obtenido de : https://oab.ambientebogota.gov.co/?post_type=dlm_download&p=3377

SDA. (2022). *Flora de los Parques Ecológicos Distritales de Humedal de Bogotá, D.C. .* Bogotá, obtenido de: Flora de los Parques Ecológicos Distritales de Humedal de Bogotá, D.C. (biodiversidad.co)

UNESCO. (2020). *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2020: agua y cambio climático.* 7, Place de Fontenoy, 75352 París 07 SP, Francia: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.

Zatar, Z., Fatima, R., & Kim, J. -O. (2021). Water matrix effect, Photocatalytic degradation, Textile wastewater, Fe–TiO2nanotubes.**197,** (1-10). doi: https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111120

Tabla 2. Sustancias químicas empleadas según el tipo de acabado funcional

Tipo de acabado	Productos empleados
Planchado permanente	Resinas sintéticas
Tejidos impermeables	Siliconas
Resistencia al fuego	Cloruro de fosfonio, cloruro de tetrakis
Tejidos a prueba de polillas	Fluoruro de silicona y fluoruro de cromo
Telas a pruebas de manchas	Silicona orgánica, fluoruros o derivados de oxazalina

Fuente: *(DAMA, 2004).*

Tabla 3. Sustitutos y Ventajas

Químico actual	Sustituir por /añadir	Ventajas /Observaciones
Ácido fórmico	Ácido acético	Reduce la DBO en los efluentes del teñido.
Detergentes no biodegradables	Detergentes biodegradables	Disminuyen la carga de contaminantes en las aguas residuales y facilitan su tratamiento.
Enzimas para ablandar el algodón	Peróxido de hidrógeno	Genera CO_2 y agua en vez de almidón hidrolizado que eleva la DBO.
Hipoclorito o clorito de Sodio	Peróxido de hidrógeno	Ventajas técnicas y ecológicas en el blanqueo.
Productos base solvente (limpieza de máquinas)	Productos base agua	Disminuye la carga de contaminantes en el agua residual y las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV).
Productos con Cromo	Químicos equivalentes sin Cromo*	Reduce la carga de Cromo en las aguas residuales y el riesgo de exposición a compuestos tóxicos.
Químicos auxiliares como los fosfatos	Ácido acético y EDTA	Reduce la carga de fosfatos en el agua residual.

Fuente: tomado de (FUNDES, 2001),adaptado por autor, 2022. Tomado de: https://www.ccb.org.co/La-Camara-CCB/Acceso-a-mercados-internacionales-y-cooperacion-para-empresas/Produccion-y-comercio-sostenible/Sala-de-prensa/La-Union-Europea-MINCIT-y-la-Camara-y-Comercio-de-Bogota-promueven-la-sostenibilidad-empresarial

65° CONGRESO INTERNACIONAL
Agua, Saneamiento, Ambiente y Energías Renovables
ACODAL
ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
Bogotá - Colombia
Centro de Convenciones Ágora
Julio 13, 14 y 15 de 2022

Removal of Pb(II) from aqueous solutions using agro-industrial residues of coffee-arabica and cocoa-theobroma

C. Lavado Meza[1*], G. Cisneros Santos[1], L. De la Cruz Cerrón[2], J. Dávalos Prado[3]

[1]Universidad Nacional Intercultural de la Selva Central Juan Santos Atahualpa
[2]Universidad Nacional del Centro del Perú
[3]Instituto de Química Física Rocasolano, CSIC, Spain
**Autor corresponsal:* Universidad Intercultural de la Selva Central Juan Santos Atahualpa, Av. Perú 612 – Pampa el Carmen, Chanchamayo, Junín. 12856. Perú. clavado@unsicjsa.edu.pe

Abstract
Coffee (BCF) and cocoa (BCC) residues were studied as biosorbents to remove lead (II) from water. The biosorbents were characterized Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). Its structural and morphological characterizations indicate that it has adsorptive functional groups (OH, C=O, C-O-C) and a porous structure. Optimal biosorption occurred at a pH of 4 - 5, the maximum adsorption capacity of Pb (II) was 123.46 and mg/g and 158.73 mg/g for BCC and BCF, respectively. The effective dose of biosorption was 2 g/L. The equilibrium data were correlated with two models (Langmuir and Freundlich), the results indicate that the biosorption process is complex. Biosorption followed a pseudo-second order kinetic model with a significantly fast rate and the process of intraparticle diffusion was the main factor controlling the rate.

KeyWords :. Langmuir isotherm, Pseudo-second order model, Residual waste valorization,

REMOCIÓN DE PB(II) DE SOLUCIONES ACUOSAS USANDO RESIDUOS AGRO-INDUSTRIALES DE CAFÉ-*ARABICA* Y CACAO-*TEOBROMA*.

Resumen
Se estudiaron los residuos del café (BCF) y cacao (BCC) como biosorbentes para eliminar el plomo (II) del agua. Los biosorbentes se caracterizaron con espectroscopía infrarroja por transformación de Fourier (FTIR). Sus caracterizaciones estructurales y morfológicas indican que posee grupos funcionales adsortivos (OH, C=O, C-O-C) y estructura porosa. La biosorción óptima se produjo a un pH de 4 - 5, la capacidad máxima de adsorción de Pb (II) fue de 123.46 y mg/g y 158.73 mg/g para la BCC y BCF respectivamente. La dosis efectiva de biosorción fue de 2 g/L. Los datos en el equilibrio fueron correlacionados con dos modelos (Langmuir y Freundlich) los resultados indican que el proceso de biosorción es complejo. La biosorción siguió un modelo cinético de pseudo-segundo orden con una tasa significativamente rápida y el proceso de difusión intrapartícular fue el factor principal de control de la tasa.

Palabras clave: Isotermas de Langmuir, modelo de pseudo segundo orden, valorización de residuos.

Introducción

Las actividades antropogénicas provocan cada vez, más impactos negativos en los ecosistemas acuáticos (Häder et al., 2020; Salazar-Pinto et al., 2021). El agua se puede contaminar a través de diferentes fuentes: salidas industriales, agua de drenaje de refinerías de petróleo y petroquímicas, efluentes domésticos. Los contaminantes inorgánicos incluyen metales, ácidos de descargas industriales como minería, galvanoplastia, corrosión de metales y fabricación de baterías (Negm et al., 2018). Los metales pesados son especialmente peligrosos debido a su toxicidad, persistencia y capacidad de bioacumularse en la cadena trófica (Palaniswamy & Veluchamy, 2017). Muchos autores informan que el Pb (II) al ser ingerido causa problemas de salud, causa un impacto negativo en el sistema nervioso, una exposición prolongada causa daño cerebral y problemas de fertilidad en hombres y mujeres (Lee et al., 2019; Lentini et al., 2019; Shooto et al., 2020). Por lo que la eliminación eficaz del plomo de las aguas residuales se convierte es un tema importante.

La biosorción es un proceso independiente de la energía donde los iones de metales pesados se adsorben en la superficie celular o en el sitio activo de los biosorbentes (Beni & Esmaeili, 2020). En los últimos años se ha reportado el uso de varios subproductos agrícolas como biosorbentes para eliminar plomo de soluciones acuosas tales como residuos de hojas de olivo (Calero et al., 2013), taro (Saha et al., 2017), penca de tuna (Lavado-Meza et al., 2020), bagazo de caña de azúcar(Tejada-Tovar et al., 2020), etc. El uso de materiales de desecho como biosorbentes es atractivo ya que se reduce los costos de tratamiento debido al bajo costo del material.

La producción de café y cacao en el Perú se encuentra incrementándose paulatinamente de hasta 135900 toneladas/año y 218000 toneladas/año de cacao y café respectivamente. De la producción nacional total, la producción en la Selva Central de la región Junín representa el 35% y 12% para el café y cacao respetivamente. En la agroindustria del café, las cerezas son procesadas generando grandes cantidades de residuos provenientes del despulpado y lavado, una tonelada de café puede producir 600 kg de residuos (Anastopoulos et al., 2017). En la cadena de procesamiento del cacao el principal residuo es la cáscara que representa el 70 - 80% del fruto total (Vásquez et al., 2019). Esta generación a gran escala de biomasa residual representa una preocupación ambiental crítica de los países productores de cacao y café ya que si no son bien dispuestos o tratados generan problemas ambientales tanto en los sistemas acuáticos como en el suelo (Anastopoulos et al., 2017). Se han reportado estudios de biosorción de plomo usando como biosorbentes residuos de café, granos de café, pulpa de café y cáscaras de cacao sin tratar (Chwastowski et al., 2020; Gomez-Gonzalez et al., 2016; Kushwaha et al., 2018; 2021; Meunier et al., 2003; Mariana et al., Obike et al., 2018) pero ningún estudio ha proporcionado datos de desorción del metal con diferentes agentes desorbentes, lo que ayudaría a analizar la factibilidad de reuso del material biosorbente (Wu et al., 2015).

Por lo que, los objetivos del presente trabajo fueron (i) caracterizar las biomasas de los residuos del café y cacao, en cuanto a la composición química, la morfología y estructura de la superficie, (ii) evaluar los parámetros que afectan el proceso de bioabsorción de los residuos de café y cacao. (iii) estudiar el equilibrio, la cinética y el mecanismo de biosorción, (iv) estudiar el proceso de regeneración de los materiales en estudio

Materiales y métodos

Preparación de los biosorbentes:

Las biomasas utilizadas en este estudio se prepararon a partir de los desechos agrícolas industriales del *Coffea arabica y Theobroma cacao,* estos fueron recolectados en las provincias de Satipo y Chanchamayo ubicadas en la Región Junín en Perú. Se eliminaron manualmente los residuos de paja y partículas de tierra para luego lavar con agua abundante agua destilada y posteriormente se llevaron al horno a una temperatura de 70ºC durante 48 h, de manera individual los materiales obtenidos se molieron y con la finalidad de homogenizar el tamaño de partícula se tamizaron con una malla de acero con certificación ASTM (malla 70 µm) conteniéndose la biomasa de residuos de café (BCF) y biomasa de residuos de cacao (BCC).

Caracterización de los biosorbentes:

Para la determinación del Punto de Carga Cero (pH_{PCC}), se puso en contacto por 24 horas, 0.05 g de biomasa con 50 ml de solución acuosa en diferentes condiciones de pH inicial que variaron de 1 a 8, tiempo después del cual se determinó el pH final (pH_f). Las soluciones con pH en el rango ácido y básico se prepararon a partir de diluciones de HCl y de NaOH 1 M, respectivamente. Luego se graficaron los valores de ΔpH ($\Delta pH = pH_o - pH_f$) versus pH inicial (pH_i), el punto de carga cero (pH_{PCC}) se obtuvo de la gráfica cuando ΔpH= 0 (do Nascimento et al., 2019)

Para identificar los grupos funcionales presentes en la superficie de los biosorbentes (BCF y BCC) antes y después de la biosorción de Pb (II) se utilizó el análisis por Espectroscopia infrarroja con transformadas de Fourier (FTIR) el análisis se realizó en un rango espectral de 4000 a 400 cm^{-1}, en un espectrofotómetro SHIMADZU FTIR- 8700.

Ensayos biosorción por lotes

Los experimentos de biosorción por lotes se llevó a cabo en un matraz Erelenmeyer de 100 mL que contenía 25 mL de solución de $Pb(NO_3)_2$ para investigar el efecto de la dosis de biosorbente (0.025, 0.05, 0.01, 0.15 y 0.2 g), pH (2, 3, 4, 4.5 y 5) y concentración inicial de Pb (II) (26.96, 52.71, 99.7, 149.86 y 196.38 mg/L) a velocidad de agitación constante a 150 rpm. Al final del tiempo de contacto predeterminado, se filtraron las mezclas y se determinó la concentración de Pb (II) en el filtrado. Para evaluar el equilibrio cinético, se trabajó a diferentes intervalos de tiempo en un rango de 0-180 min. El estudio de la influencia del pH se realizó ajustando el pH de la solución inicial en un rango de 2-6 utilizando soluciones 0.1 M NaOH y HNO_3. La concentración final del plomo en la solución en equilibrio (C_e) se determinó por absorción atómica con un espectrofotómetro marca SHIMADZU modelo AAS 6800 a una longitud de onda de 283.3nm.

Estudios de desorción:

El proceso de desorción se desarrolló usando cinco tipos de soluciones 0,1 M de HCl, HNO_3, H_2SO_4 CH_3COOH y NaOH. Inicialmente, se tomaron 100 mg de la BCC y BCF cargadas con plomo cada una y se agitó a 120 rpm con 50 mL de cada una de las soluciones antes mencionadas. Los eluyentes se filtraron y se detectó el Pb(II) desorbido. Las biomasas se lavaron con agua destilada y se usaron nuevamente para la adsorción de Pb(II) por segunda vez este proceso se realizó hasta 4 veces.

La capacidad de biosorción y la eficiencia de remoción de Pb (II) se calcularon usando las siguientes ecuaciones (Morosanu et al., 2017):

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)}{M} xV \qquad \text{ecuación (1)}$$

$$\%R = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} x100 \qquad \text{ecuación (2)}$$

Dónde: C_o y C_e son la concentración inicial y final del Pb (II) en la solución (mg/L) antes y después de la biosorción respectivamente, M es la masa de la biomasa (g), y V es el volumen de la solución (L).

Para evaluar el equilibrio cinético, se trabajó a diferentes intervalos de tiempo en un rango de 1-180 min. Los datos se evaluaron con tres modelos cinéticos.

El modelo de pseudo primer orden, el cual se puede representar de la siguiente manera (Shooto *et al*., 2020)

$$log(q_e - q_t) = \log(q_e) - \frac{k_1}{2.303} t \qquad \text{ecuación (3)}$$

Dónde:

q_t, es la cantidad de Pb (II) biosorbido por una cantidad de BNC en un tiempo t (mg/g).
q_e, es la cantidad de Pb (II) retenido por unidad de masa de sorbente en condiciones de equilibrio (mg/g).
k_1 es la constante cinética de primer orden (min^{-1}).
t es el tiempo de agitación (min).
Para evaluar los datos se usó un gráfico lineal de log ($q_e - q_t$) versus t, para determinar la constante de velocidad y q_e tomando en cuenta los valores de la pendiente y la intersección, respectivamente, los valores de los parámetros se visualizan en la tabla 2.
El modelo de pseudo segundo orden, se expresa del siguiente modo (Blázquez et al., 2014) :

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \qquad \text{ecuación (4)}$$

Dónde:
k_2 es la constante de velocidad de adsorción de Pb (II) (g/mg.min)
h es la tasa de sorción inicial (mg/g min)

$$q_t = k_{di}.t^{0.5} + C \qquad \text{ecuación (5)}$$

Donde:
q_t es la cantidad de plomo adsorbido por la biomasa en un tiempo t (mg/g)
k_{di} es la constante de la difusión intraparticular ($mg/g.min^{1/2}$)
C = intercepto de la curva lineal (mg/g)

Los datos experimentales fueron correlacionados con dos modelos de isotermas, el modelo de Langmuir asume una sorción del soluto en monocapa con una energía de sorción homogénea (Elwakeel et al., 2017). Este modelo es expresado mediante la siguiente ecuación:

$$q_e = q_{max} \frac{K_0.C_e}{1 + K_L C_e} \qquad \text{ecuación (6)}$$

Donde:
q_e (mg/g): capacidad de sorción en el equilibrio
q_{max} (mg/g): capacidad de sorción en monocapa, K_L, es una constante que representa la afinidad entre el adsorbato y el adsorbente
Ce: (mg/L): concentración del adsorbato en el equilibrio.

El modelo de Freundlich es una expresión empírica que asume la sorción del soluto en multicapas, considerando que las energías de sorción son heterogéneas. El modelo de Freundlich es expresado mediante la ecuación 8.

$$q = K_F.C_e^{1/n} \qquad \text{ecuación (7)}$$

Donde:
K_F (L/g): constante de la adsorción en equilibrio
n: constante característica asociada al grado de favorabilidad de la adsorción.

La eficiencia de la desorción de la biomasa fue calculada usando la siguiente ecuación (Nayak & Pal, 2017):

$$\text{Eficiencia de desorción } \% = \frac{\text{cantidad de Pb(II) desorbido de la biomasas}}{\text{cantidad de Pb(II) adsorbido por la biomasa}} x\ 100 \quad \text{ecuación (8)}$$

Aseguramiento de la calidad

Para asegurar la precisión y reproducibilidad de los datos recopilados, todos los frascos, matraces y materiales de vidrio se mantuvieron en remojo durante 24 h, en una solución de HNO_3 al 5%; después se enjuagaron dos veces con agua destilada y se secaron al horno. Todos los experimentos se realizaron por triplicado y se reportaron sus respectivas medias. Los gráficos se realizaron a partir de una hoja de cálculo de Microsoft Excel (versión 2016) y en ellos se muestran, por cada corrida experimental, las desviaciones estándar respectivas.

Resultados y discusión

Caracterización de la biomasa:

Los valores de punto de Carga cero (pH_{PCC}) se obtuvieron a partir de la Figura 1, como se puede observar las dos curvas pertenecientes a la BCF y BCC interceptan el eje pH_i a pH 6.5 (pH_{PCC} = 4.8) y pH 7 (pH_{PCC} =3.9) respectivamente. Esto indica que las superficies de la BCF y BCC están cargadas positivamente a pH < 4.8 y 3.9 respectivamente. Luego, las superficies de los biosorbentes a pH > pH_{PCC} comienzan a cargarse negativamente (Moghazy et al., 2019; Morosanu et al., 2017) favoreciendo la atracción electrostática a valores de pH mayores.

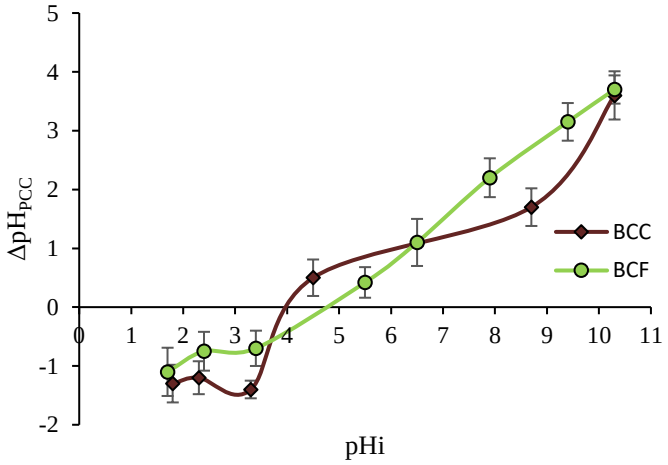


Figura 1. Determinación del pH_{PPC} de la bioamasa de café (BCF) y biomasa de cacao (BCC)

El análisis espectral IR no solo se usó para identificar los grupos funcionales presentes en la superficie de los biosorbentes BCF y BCC sino también para investigar las interacciones entre los grupos funcionales y los iones de plomo. La Figura 2a muestran los espectros de la BCC limpio y después de la biosorción de Pb (II), se puede observar una banda ancha a 3310.2 cm^{-1} la que se atribuye a las vibraciones estiramiento del enlace -OH en la muestra lo que confirma la presencia de celulosa y lignina (Flores-Trujillo et al., 2021; Taşar et al., 2014). Luego se observa otras bandas a 2917.3 cm^{-1} y 1244.6 cm^{-1} las cuales están relacionadas al estiramiento simétrico del enlace C-H en componentes lignocelulósicos (Heraldy et al., 2018). La banda de absorción a 1630.2 cm^{-1} se debe al estiramiento asimétrico del doble enlace C=O del grupo carbonilo (Barka et al., 2013). El pico de alta intensidad a 1015.8 cm^{-1} es característico del estiramiento C-O-C en los polisacáridos (Morosanu et al., 2017). Una banda a 1412. 3 cm^{-1} es debido al estiramiento de C-OH y C=O de carboxilatos (Barka et al., 2013). El espectro de IR después del contacto con la solución de Pb (II) muestra cambios en el tamaño y desplazamiento en los algunos picos de adsorción. Las bandas a

3310.2 cm^{-1}, 1660.2 cm^{-1}, 1015.8 cm^{-1} se desplazaron a 3301.8cm^{-1}, 1651.1 cm^{-1}, 1011.8 cm^{-1} estas observaciones sugieren que el grupos O-H, C-O y C-O-C estarían involucrados en la biosorción de Pb (II) (Morosanu et al., 2017). Un similar comportamiento lo reportaron Barka et al., (2013) cuando removieron Pb y Cd con cladodios de tuna.

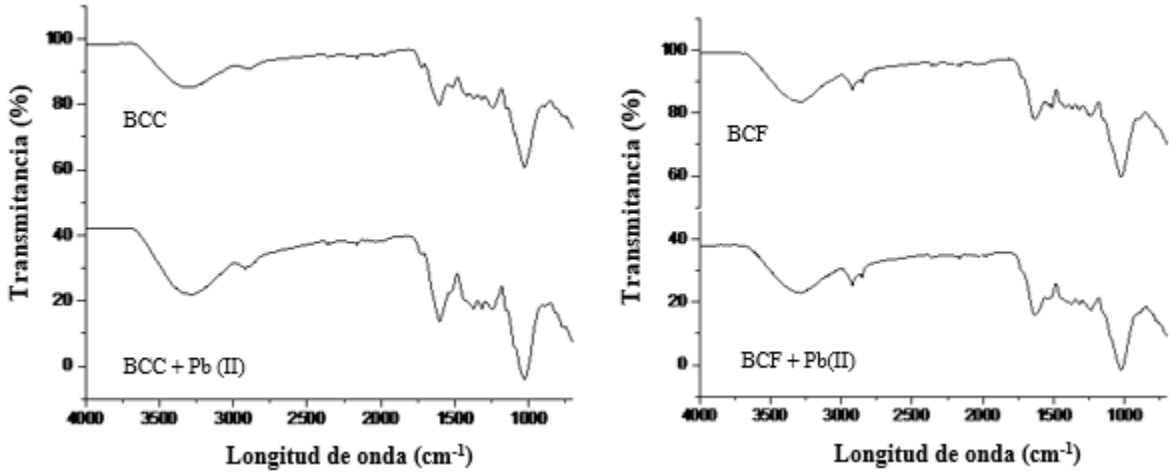


Figura 2. Espectro FTIR a) BCC antes y después de la biosorción de Pb (II), b) BCF y antes y después de la biosorción de Pb (II).

La figura 2b muestran los espectros del análisis IR de la BCF antes y después del contacto con el Pb(II), se puede observar picos muy similares a los mostrados en la figura 2a. Bandas a: 3322.7 cm^{-1} (grupos OH), 2932.7 cm^{-1} y 1248.3 cm^{-1} (C-H), 1670.4 cm^{-1} (C=O), 1012. 7 cm^{-1} (C-O-C). El análisis del espectro después de la biosorción muestra un desplazamiento de los picos, la banda a 3322.7 cm^{-1}, 1670.4 cm^{-1} y 1012.7cm^{-1} se desplazaron a 3330.4 cm^{-1}, 1658.2 cm^{-1} y 1020.8 cm^{-1}.
Estos resultados indica que los grupos involucrados en la biosorción de las biomasas de café y cacao, serían el OH, C-O y C-O-C.
El análisis EDS (Fig. 3a y 3c) indica los elementos presentes en la BCC y BCF respectivamente antes de la biosorción.

Ensayos de biosorción:
Se evaluó la influencia de la dosis de la BCC y BCF el porcentaje de remoción (%R), para lo cual se pusieron en contacto diferentes cantidades de BCC y BCF (0.025 – 0.2 g) en 25 mL de solución de plomo cuya concentración fue 26.96 mg/L, manteniéndose constantes todas las demás variables (pH, tiempo de contacto y temperatura), los datos se visualizan en la figura 3.

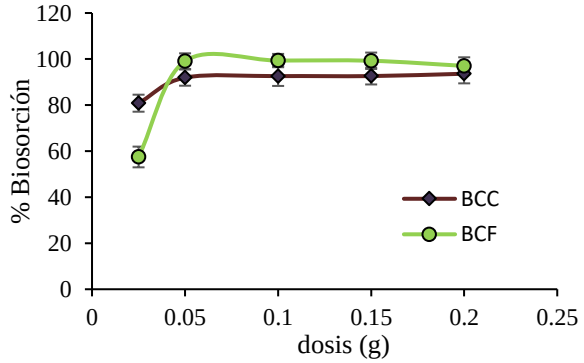


Figura 3. Influencia de la dosis de la biomasa sobre % de biosorción, pH = 4.5, tiempo de agitación = 120 min.

Para ambas biomasas (BCC y BCF) es evidente que el aumento gradual de las diferentes cantidades de biosorbentes de 0.025 a 0.05 g tiene un aumento considerable de la eficacia del proceso de adsorción del Pb (II). Un aumento adicional en las cantidades de biosorbentes mayores a 0.05 g tiene una influencia menor en la eficiencia de adsorción. Este comportamiento podría ser explicado con el aumento en la cantidad de biosorbente aumenta el número de sitios de adsorción que son responsables de la adsorción del metal del medio que a su vez está relacionado con la estructura química y los componentes bioactivos de la biomasa en estudio (Negm et al., 2018). Un aumento adicional del biosorbente sobre 0.05 g de biomasa no mejoró el porcentaje de adsorción.

El estudio de la isoterma de adsorción del proceso de adsorción de iones metálicos sobre los adsorbentes es esencial para comprender el mecanismo de adsorción. El resultado principal del estudio de isotermas de adsorción es describir la distribución de las moléculas adsorbidas en las interfaces adsorbentes (Blázquez et al., 2014). Algunas de las isotermas de adsorción más conocidas son los modelos de adsorción de Langmuir y Freundlich (Fomina & Gadd, 2014). Las isotermas de biosorción de plomo se estudiaron en un rango de concentraciones iniciales de plomo entre 26.98 y 196.4 mg/L y fueron obtenidas graficando la capacidad de adsorción (q_e) expresada en mg de Pb (II))/g de biomasa versus la concentración del Pb(II) en equilibrio (C_e) y se muestran en la Figura 4.

La forma cóncava de las curvas de la isoterma de la figura 4 indica la gran afinidad de la BCC y BCF por el Pb (II) (Taşar et al., 2014). Los datos experimentales fueron correlacionados con dos modelos de isotermas, el modelo de Langmuir y Freundlich. El modelo de Langmuir asume una sorción del soluto en monocapa con una energía de sorción homogénea (Beni & Esmaeili, 2020). Los valores de q_{max}, y K_L se hallaron luego de graficar C_e/q_e versus C_e (figura 5a).

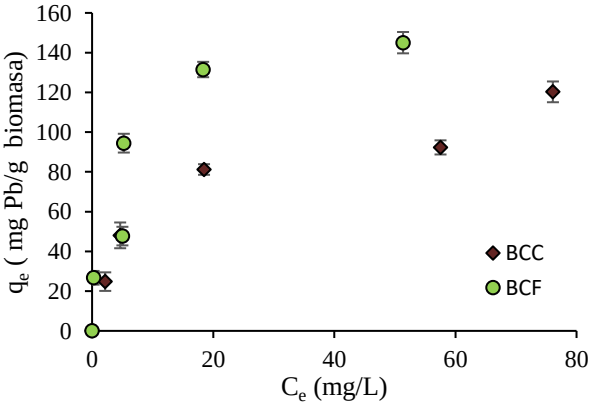


Figura 4. Isoterma de biosorción, pH = 4.5, T = 20°C, dosis biomasa 0.05 g , t = 120 min

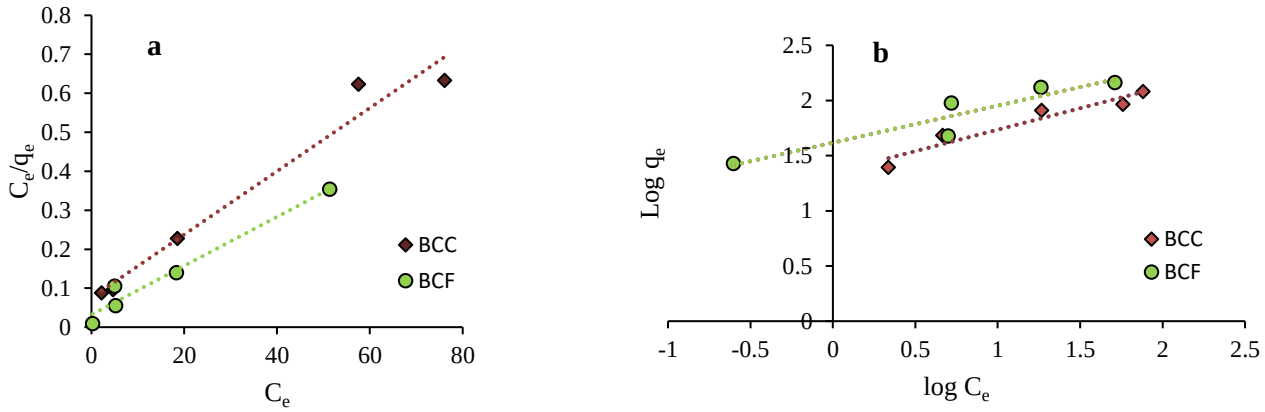


Figura 5. Correlación de los datos experimentales a) modelo de Langmuir b) modelo de Freundlich.

El modelo de Freundlich es una expresión empírica que asume la sorción del soluto en multicapas, considerando que las energías de sorción son heterogéneas (Srivastava et al., 2015). Los parámetros del modelo de Freundlich se hallaron luego de graficar log q_e versus log C_e (Figura 5b).

En la tabla 1 se puede observar las constantes de ambos modelos, examinando las correlaciones se observa que los valores experimentales se ajustan mucho mejor al modelo de Langmuir con un valor de R^2 de 0.9652 y 0.9653 la cual explica una sorción en monocapa en centros activos energéticamente homogéneos, los valores de K_L 0.011 0.20 para la BCC y BCF respectivamente indican una alta afinidad de ambos biosorbentes con el sorbato (Barquilha et al., 2019). Los valores de 1/n entre 0 y 1 indican que la biosorción de Pb (II) en sobre la BCC y BCF es favorable bajo las condiciones estudiadas (Lavado-Meza et al., 2021; Reddy et al., 2010). Por otro lado, los valores de R^2 para el modelo de Freundlich 0.8702 y 0.9757 para la BCC y BCF respectivamente, indicarían que la superficie de ambos biosorbentes podría ser heterogénea y que el proceso de biosorción sería también en multicapa (Ou et al., 2015). Estos resultados indicarían que el proceso de biosorción en ambas biomasas en estudio, es complejo (Saha et al., 2017).

Tabla 1. Parámetros de los modelos de las isotermas de adsorción de Pb(II) en equilibrio

	Parámetros Langmuir			**Parámetros Freundlich**		
Biomasa	**q_{max} mg /g**	**K_L**	**R^2**	**K_F**	**1/n**	**R^2**
BCC	123.46	0.11	0.9652	41.45	0.34	0.8702
BCF	158.73	0.20	0.9653	22.19	0.39	0.9257

Estudio cinético:

El tiempo es un factor importante que afecta la eficiencia de la biosorción. La figura 6 muestra los resultados de los ensayos cinéticos realizados para determinar el tiempo de equilibrio requerido para la biosorción de plomo por la BCC y BCF, se observa que la capacidad de biosorción de Pb(II) para ambos biosorbentes se incrementa significativamente con el incremento del tiempo de contacto hasta 60 minutos y por encima de este tiempo se torna constante. Estudios han informado un comportamiento similar usando residuos de cáscaras de maní (Taşar et al., 2014) y pepas de aceituna (Ronda et al., 2015).

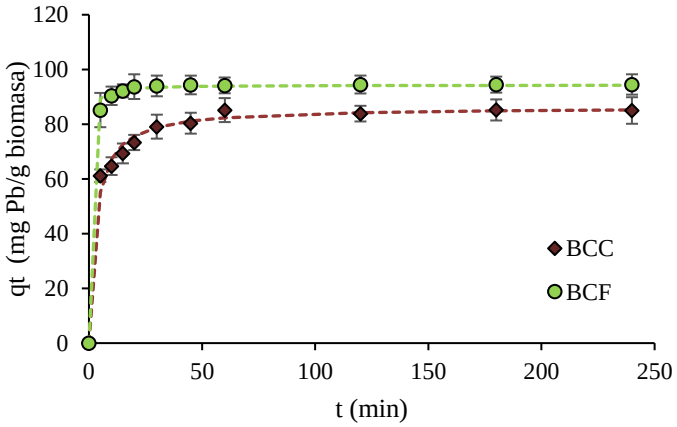


Figura 6. Influencia del tiempo de contacto sobre la q_e de Pb (II) de la BCC y BCF, C_o = 127.5 mg/L, pH=4.5

Los parámetros cinéticos fueron calculados luego de graficar:

1. Log (q_e-q_t) frente al tiempo (t) (modelo de seudo primer orden).
2. t/q_t frente al tiempo (t) (modelo de seudo segundo orden).
3. q_t frente a $t^{1/2}$ (modelo de difusión intraparticular).

Los valores experimentales y calculados de q_e, los parámetros de la ecuación de pseudo-segundo orden y los valores del coeficiente de correlación (R^2) se resumen en la Tabla 2.

Tabla24. Constantes de los modelos cinéticos, T = 20°C, concentración inicial de Pb (II) = 99.7 mg/L

Modelo	Parámetros	Biomasa	
		BCC	BCF
pseudo primer orden	k_1	0.02	0.07
	$q_{e,\ cal\ (mg/L)}$	17.98	6.12
	R^2	0.95	0.78
pseudo segundo orden	$k_{2\ (g/mg.min)}$	0.006	0.035
	$q_{e,\ cal\ (mg/L)}$	86.21	94.34
	h (mg/g.min)	46.73	312.5
	R^2	0.99	1
Intra-particle diffusion	$k_{id\ I}$ (mg/ g·$min^{0.5}$)	5.47	3.78
	$k_{id\ II}$ (mg/ g·$min^{0.5}$)	3.29	0.16
	$k_{id\ III}$ (mg/ g·$min^{0.5}$)	0.02	0.04

Para ambos biosorbentes se puede observar que el modelo de pseudo-segundo muestra una buena correlación $R^2 = 1$ y $R^2 = 0.9996$ para la BCC y BCF respectivamente, lo que indica que este modelo es el que mejor correlaciona los datos cinéticos del proceso de biosorción del Pb (II) sobre la BCC y BCF, así mismo predice con mayor precisión los valores de $q_{e,exp}$, por lo que se puede asumir que el proceso de biosorción se estaría llevando a cabo por quimisorción. En la tabla 2 se puede observar que la BCF presenta una mayor velocidad de biosorción (h = 312.5 mg/g.min) en comparación a la BCC (h = 46.73 mg/g.min).

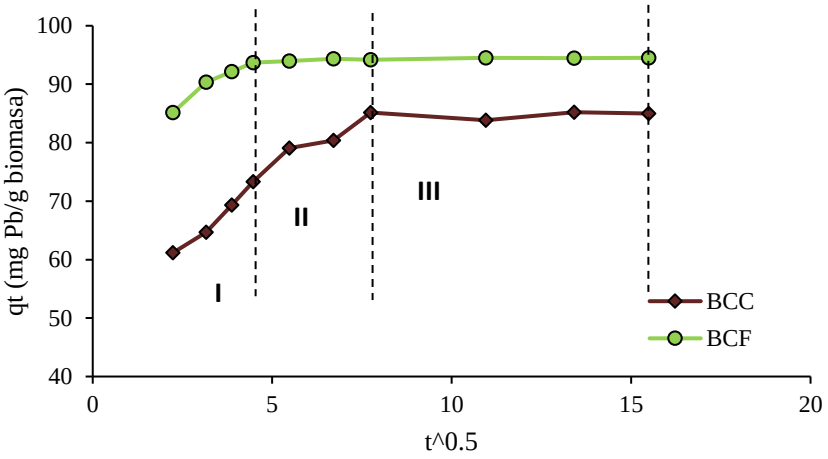


Figura 7. Correlación de los resultados experimentales con el modelo de difusión intraparticular para la biosorción de Pb(II), sobre la BCC Y BCF

Para observar la influencia del mecanismo de difusión sobre la velocidad del proceso de sorción, se evaluó el modelo intrapartícular (propuesto por Weber -Morris). Las gráficas lineales de q_t versus $t^{0.5}$ para las dos biomasas BCC y BCF se presentan en la Fig. 10. En este estudio, las gráficas se presentan como curvas con tres porciones lineales. Corresponden a las etapas de absorción de metales por sorbentes. i) La primera parte, con una pendiente más alta, muestra la rápida absorción de iones de plomo en la superficie exterior de la biomasa BCF o BCC. ii) Luego sigue la etapa de sorción gradual, en la que los iones de Pb(II) ingresan en los poros biosorbentes. A medida que los poros se llenan de sorbato, la velocidad de difusión disminuye y es el paso que controla la velocidad. Esto podría atribuirse a la difusión hacia los mesoporos. iii) En la etapa III, la difusión intrapartícular en los microporos se decrece, mientras se alcanza el equilibrio entre los iones Pb(II) en la solución y en la superficie del sorbente. En la tabla 4 se observa que los valoresde kidIII son bajos tanto para la BCC y BCF esto indicaría que la difusión intrapartícula en microporos es el paso limitante de la velocidad en el proceso de biosorción (Saha et al., 2017). Morosanu et al., (2017), Negm et al., (2018) y Blázquez et al., (2014) reportaron comportamientos similares en la gráfica de difusión intraparticular cuando removieron Pb (II) usando rapeseed biomass, brown algae and fungi, olive stone respectivamente.

Influencia del pH:

El pH de una solución acuosa es un factor vital en la biosorción de iones metálicos. Determina las propiedades superficiales del adsorbente en términos de cargas superficiales, ionización de los grupos funcionales y grado de disociación de los grupos funcionales presentes en los sitios activos de los adsorbentes (Ezeonuegbu et al., 2021).. La figura 11 muestra la influencia del pH sobre la capacidad de biosorción de Pb(II) de los biosorbentes BCC y BCF, se observa que para ambos biosorbentes a valores de pH ácidos los valores de q_e son bajos pero conforme el valor del pH

se incrementa también lo hace la q_e, alcanzado una capacidad máxima de biosorción a partir de pH = 5. Este comportamiento se debería a que a bajos valores de pH la competencia de los iones H_3O^+ y Pb^{2+} para ocupar los sitios activos del biosorbente es alta y conforme el valor del pH se incrementa, esta competición disminuye consecuentemente aumentando el valor de q_e. Por otro lado, la fuerza de atracción/repulsión electrostática entre el Pb (II) cargado positivamente en la solución y la superficie biosorbente que desarrolló una carga (positiva o negativa) dependiendo del pH de la solución. A pH <pH_{PCC}, la concentración de H_3O^+ es mayor y la mayoría de los sitios activos del biosorbente pueden estar ocupados por H_3O+, lo que hace que las superficies de los biosorbentes (BCF y BCC) sean predominantemente positivas. En tal situación, el adsorbente repele los iones de plomo positivos reduciendo la capacidad de eliminación de Pb (II). El escenario opuesto se observa a pH> pH_{PCC}. A valores de pH más altos, las superficies de los biosorbentes BCF y BCC se vuelven negativas ofreciendo una atracción electrostática para los iones Pb (II) por lo tanto la capacidad de biosorción de Pb(II) se incrementa. Estos resultados también concuerdan con muchos estudios de adsorción que informan un rango de pH de 4-6 como el pH óptimo para la biosorción de Pb(II) por varios adsorbentes: biomasa de palmera carnauba(Oliveira et al., 2021), cáscara de plátano (Afolabi et al., 2021) y residuos de tomate (Heraldy et al., 2018).

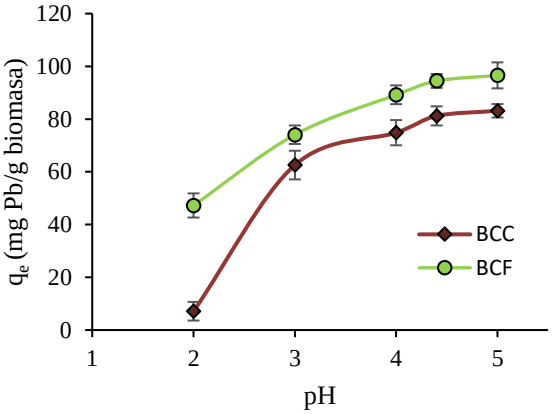


Figura 8. Influencia del pH sobre la capacidad de remoción de Pb(II), T = 20°C, t = 120 min, dosis = 0.05 g

Conclusiones

El interés en el desarrollo de biomateriales de bajo costo para la eliminación del plomo de aguas contaminadas llevó a investigar la biosorción de Pb usando biomasa de residuos de café y cacao. Para ello se estudió el mecanismo de biosorción, las isotermas y la cinética para la biosorción de Pb (II) en la biomasa de residuos de café (BCF) y cacao (BCC). Se desarrolló un procedimiento de biosorción fácil y viable junto con un proceso de regeneración simple. Los estudios de isotermas llevaron a la conclusión de que la biosorción de Pb (II) sobre la BCF y BCC implica un mecanismo complejo. Además, la biosorción sobre la BCC y BCF implica una cinética rápida, donde la regeneración de estos materiales se puede implementar mediante un método muy simple. Los resultados cinéticos de ambas biomasas en estudio se ajustaron mejor al modelo de seudo segundo orden lo que indica que la que la tasa de biosorción puede estar controlada por el proceso de quimisorción. El desempeño en la eliminación de Pb (II) de las biomasas de café y cacao, sugiere que podrían ser biosorbentes ideales para eliminar el Pb de aguas contaminadas. Por lo tanto, la aplicación práctica podría ser interesante en términos de su simplicidad, eficiencia y rentabilidad.

Referencias

Afolabi, F. O., Musonge, P., & Bakare, B. F. (2021). Evaluation of lead (Ii) removal from wastewater using banana peels: Optimization study. *Polish Journal of Environmental Studies*, *30*(2), 1487–1496. https://doi.org/10.15244/pjoes/122449

Barka, N., Abdennouri, M., El Makhfouk, M., & Qourzal, S. (2013). Biosorption characteristics of cadmium and lead onto eco-friendly dried cactus (Opuntia ficus indica) cladodes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *1*(3), 144–149. https://doi.org/10.1016/j.jece.2013.04.008

Barquilha, C. E. R., Cossich, E. S., Tavares, C. R. G., & da Silva, E. A. (2019). Biosorption of nickel and copper ions from synthetic solution and electroplating effluent using fixed bed column of immobilized brown algae. *Journal of Water Process Engineering*, *32*(June), 100904. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100904

Beni, A. A., & Esmaeili, A. (2020). Biosorption, an efficient method for removing heavy metals from industrial effluents: A Review. *Environmental Technology and Innovation*, *17*, 100503. https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100503

Blázquez, G., Calero, M., Ronda, A., Tenorio, G., & Martín-Lara, M. A. (2014). Study of kinetics in the biosorption of lead onto native and chemically treated olive stone. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, *20*(5), 2754–2760. https://doi.org/10.1016/j.jiec.2013.11.003

do Nascimento, J. M., de Oliveira, J. D., & Leite, S. G. F. (2019). Chemical characterization of biomass flour of the babassu coconut mesocarp (Orbignya speciosa) during biosorption process of copper ions. *Environmental Technology and Innovation*, *16*, 100440. https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100440

Elkhaleefa, A., Ali, I. H., Brima, E. I., Shigidi, I., Elhag, A. B., & Karama, B. (2021). Evaluation of the adsorption efficiency on the removal of lead(II) ions from aqueous solutions using Azadirachta indica leaves as an adsorbent. *Processes*, *9*(3). https://doi.org/10.3390/pr9030559

Elwakeel, K. Z., Elgarahy, A. M., & Mohammad, S. H. (2017). Journal of Environmental Chemical Engineering Use of beach bivalve shells located at Port Said coast (Egypt) as a green approach for methylene blue removal. *Biochemical Pharmacology*, *5*(1), 578–587. https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.12.032

Ezeonuegbu, B. A., Machido, D. A., Whong, C. M. Z., Japhet, W. S., Alexiou, A., Elazab, S. T., Qusty, N., Yaro, C. A., & Batiha, G. E. S. (2021). Agricultural waste of sugarcane bagasse as efficient adsorbent for lead and nickel removal from untreated wastewater: Biosorption, equilibrium isotherms, kinetics and desorption studies. *Biotechnology Reports*, *30*, e00614. https://doi.org/10.1016/j.btre.2021.e00614

Flores-Trujillo, A. K. I., Mussali-Galante, P., de Hoces, M. C., Blázquez-García, G., Saldarriaga-Noreña, H. A., Rodríguez-Solís, A., Tovar-Sánchez, E., Sánchez-Salinas, E., & Ortiz-Hernández, L. (2021). Biosorption of heavy metals on Opuntia fuliginosa and Agave angustifolia fibers for their elimination from water. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *18*(2), 441–454. https://doi.org/10.1007/s13762-020-02832-8

Fomina, M., & Gadd, G. M. (2014). Biosorption: Current perspectives on concept, definition and application. *Bioresource Technology*, *160*, 3–14. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.102

Heraldy, E., Lestari, W. W., Permatasari, D., & Arimurti, D. D. (2018). Biosorbent from tomato waste and apple juice residue for lead removal. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *6*(1), 1201–1208. https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.12.026

Hossain, A., Ngo, H., Guo, W., & Nguyen, V. (2012). Biosorption of Cu(II) From Water by Banana Peel Based Biosorbent: Experiments and Models of Adsorption and Desorption. *Journal of Water sustainability*, *2*(1), 87–104. https://doi.org/10.11912/jws.2.1.87-104

Lavado-Meza, C., Asencios, O. Y. J., Cisneros-Santos, G., & Unchupaico-Payano, I. (2021). Revista Mexicana de Ingeniería Q uímica. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, *2*, 941–954. https://doi.org/https://doi.org/10.24275/rmiq/IA2291

Moghazy, R. M., Labena, A., & Husien, S. (2019). Eco-friendly complementary biosorption process of methylene blue using micro-sized dried biosorbents of two macro-algal species (Ulva fasciata and Sargassum dentifolium): Full factorial design , equilibrium and Kinetic studies. *International Journal of Biological Macromolecules*, *134*, 330–343. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.04.207

Morosanu, I., Teodosiu, C., Paduraru, C., Ibanescu, D., & Tofan, L. (2017). Biosorption of lead ions from aqueous effluents by rapeseed biomass. *New Biotechnology*, *39*, 110–124. https://doi.org/10.1016/j.nbt.2016.08.002

Nayak, A. K., & Pal, A. (2017). Green and ef fi cient biosorptive removal of methylene blue by Abelmoschus esculentus seed : Process optimization and multi-variate modeling. *Journal of Environmental Management*, *200*, 145–159. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.05.045

Negm, N. A., Abd El Wahed, M. G., Hassan, A. R. A., & Abou Kana, M. T. H. (2018). Feasibility of metal adsorption using brown algae and fungi: Effect of biosorbents structure on adsorption isotherm and kinetics. *Journal of Molecular Liquids*,

264, 292–305. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.05.027

Oliveira, M. R. F., do Vale Abreu, K., Romão, A. L. E., Davi, D. M. B., de Carvalho Magalhães, C. E., Carrilho, E. N. V. M., & Alves, C. R. (2021). Carnauba (Copernicia prunifera) palm tree biomass as adsorbent for Pb(II) and Cd(II) from water medium. *Environmental Science and Pollution Research*, *28*(15), 18941–18952. https://doi.org/10.1007/s11356-020-07635-5

Ou, H., Tan, W., Niu, C. H., & Feng, R. (2015). Enhancement of the Stability of Biosorbents for Metal-Ion Adsorption. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, *54*(23), 6100–6107. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b00518

Reddy, D. H. K., Harinath, Y., Seshaiah, K., & Reddy, A. V. R. (2010). Biosorption of Pb(II) from aqueous solutions using chemically modified Moringa oleifera tree leaves. *Chemical Engineering Journal*, *162*(2), 626–634. https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.06.010

Ronda, A., Martín-Lara, M. A., Almendros, A. I., Pérez, A., & Blázquez, G. (2015). Comparison of two models for the biosorption of Pb(II) using untreated and chemically treated olive stone: Experimental design methodology and adaptive neural fuzzy inference system (ANFIS). *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, *54*, 45–56. https://doi.org/10.1016/j.jtice.2015.03.004

Saha, G. C., Hoque, M. I. U., Miah, M. A. M., Holze, R., Chowdhury, D. A., Khandaker, S., & Chowdhury, S. (2017). Biosorptive removal of lead from aqueous solutions onto Taro (Colocasiaesculenta(L.) Schott) as a low cost bioadsorbent: Characterization, equilibria, kinetics and biosorption-mechanism studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *5*(3), 2151–2162. https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.04.013

Shooto, N. D., Thabede, P. M., Bhila, B., Moloto, H., & Naidoo, E. B. (2020). Lead ions and methylene blue dye removal from aqueous solution by mucuna beans (velvet beans) adsorbents. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *8*(2), 103557. https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103557

Srivastava, S., Agrawal, S. B., & Mondal, M. K. (2015). Biosorption isotherms and kinetics on removal of Cr(VI) using native and chemically modified Lagerstroemia speciosa bark. *Ecological Engineering*, *85*, 56–66. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.10.011

Taşar, Ş., Kaya, F., & Özer, A. (2014). Biosorption of lead(II) ions from aqueous solution by peanut shells: Equilibrium, thermodynamic and kinetic studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *2*(2), 1018–1026. https://doi.org/10.1016/j.jece.2014.03.015

Tran, H. T., Vu, N. D., Matsukawa, M., Okajima, M., Kaneko, T., Ohki, K., & Yoshikawa, S. (2016). Heavy metal biosorption from aqueous solutions by algae inhabiting rice paddies in Vietnam. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *4*(2), 2529–2535. https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.04.038

ACODAL
ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
65° CONGRESO INTERNACIONAL
Agua, Saneamiento, Ambiente y Energías Renovables
Bogotá - Colombia
Centro de Convenciones Ágora
Julio 13, 14 y 15 de 2022

Análisis Comparativo del Impacto de la Huella de Carbono de Concretos Marca CEMEX

Julio Cesar Ramírez Rodriguez[1], Ana Edilce Sánchez Rojas [1]
[1] Facultad de Ingeniería, Universidad Internacional del Trópico Americano-Unitrópico.

ABSTRACT
In commitment to the environmental challenges facing the country's capacity to adapt to climate change and framed in the lines of action, production and sustainable infrastructure, the project focuses on the development of a comparative analysis between four types of CEMEX brand concrete (Normal NSC, Low Footprint 1, Low Footprint 2, and Low Footprint HPSCC), in order to determine the impact of each of them in terms of the amount of volume required for the construction of four buildings of different heights (12, 14, 30 and 60 floors). The SimaPro software and the Ecoinvent 3 database of this software were used to estimate the carbon footprint for each type of concrete and to establish different impact scenarios. As a result, it was found that the most efficient concretes are Low Footprint 2 concrete for 12 and 14-story buildings, guaranteeing a decrease in CO2 emissions of up to 48% and 33%, respectively. On the other hand, for high-rise buildings, the use of Low Footprint HPSCC concrete reduces emissions by 41% for 30-story buildings and 33% for 60-story buildings. In comparison, the minimum environmental savings that can be generated in terms of carbon dioxide emissions is 33% and a maximum of 56% with the specifications mentioned in this study.

Key Words: Climate Change, Concrete, Carbon Footprint, Infrastructure, Life Cycle Assessment.

ACODAL
ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
65° CONGRESO INTERNACIONAL
Agua, Saneamiento, Ambiente y Energías Renovables
Bogotá - Colombia
Centro de Convenciones Ágora
Julio 13, 14 y 15 de 2022

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL IMPACTO DE LA HUELLA DE CARBONO DE CONCRETOS MARCA CEMEX

RESUMEN
En compromiso con los desafíos en materia ambiental frente a la capacidad de adaptación del país frente al cambio climático y enmarcados en las líneas de acción producción e infraestructura sostenible. En este sentido, el proyecto se centra en la elaboración de un análisis comparativo entre cuatro tipos de concreto marca CEMEX (Normal NSC, Baja Huella 1, Baja Huella 2, y Baja Huella HPSCC), con el fin de determinar el impacto que tiene cada uno de ellos en función de la cantidad de volumen necesario para la construcción de cuatro edificios de distintas alturas (12 ,14 30 y 60 pisos). Para su desarrollo se empleó el software SimaPro y la base datos Ecoinvent 3 del mismo, el cual permitió la estimación de la huella de carbono para cada tipo de concreto y el establecimiento de escenarios de impacto. Como resultados se encontró que los concretos con mayor eficiencia son el concreto tipo Baja Huella 2 para edificaciones de 12 y 14 pisos garantizando la disminución de emisiones de CO2 hasta un 48% y 33 % respectivamente y para edificios de gran altura el uso del concreto Baja Huella HPSCC permite la reducción de emisiones en un 41% para edificios de 30 pisos y un 33% para edificios de 60 pisos. Es decir que el mínimo ahorro ambiental que se puede generar en cuanto a emisiones de dióxido de carbono es de un 33% y un máximo de un 56% con las especificaciones mencionadas en el presente estudio

Palabras clave: Análisis de ciclo de vida, Concreto, Huella de Carbono, Infraestructura.

Introducción

La industria del concreto en todo el mundo juega un papel importante en la economía y el desarrollo de un país, ya que el concreto es un material esencial para el desarrollo de la infraestructura. El concreto es el material más consumido después del agua, y es el material artificial más consumido en el mundo. El alto consumo de concreto para diferentes aplicaciones se puede asociar con su excelente rendimiento y versatilidad junto con la disponibilidad local de materias primas que lo hace adecuado para diversas aplicaciones de construcción (Adesina, 2020). El concreto como material de construcción es un material ecológico en comparación con otros materiales como el acero y el vidrio. Sin embargo, en países como Canadá, “se ha estimado que un metro cúbico de concreto (m^3) por canadiense se utiliza para la construcción de diversas infraestructuras y su industria del concreto contribuye con unos 76.000 millones de dólares anuales a la economía canadiense” (Cement Association of Canada, 2021). En Colombia, la industria

de la construcción es la tercera más grande en América Latina (USD 22,1 mil millones en 2019) después de Brasil y México. Además, es un sector que contribuye al desarrollo económico del país, en 2019 el sector representó el 7,2% del PIB del país" (DANE, 2019).En promedio el país construye cada año 17,8 millones de m^2 en nuevas áreas. En 2019 el país licenció 23,1 millones de m^2 para la construcción, de esta área licenciada el 80,8% se destinó para vivienda, 9,7% para comercio, 3,6% para oficinas y 27,2% para otro tipo de construcciones (DANE, 2019). Por lo tanto, además del suministro de materiales para la construcción, la industria que gira en torno a la producción de concreto también está contribuyendo significativamente a la economía en términos de aumentar el producto interno bruto y brindar oportunidades de empleo en el país. No obstante, el alto uso de concreto ha convertido a la industria en una de las mayores consumidoras de recursos naturales y una de las principales contribuyentes a la emisión antropogénica de dióxido de carbono en el mundo, siendo el cemento el responsable de aproximadamente del 7 % de las emisiones globales de gases de efecto invernadero y se prevé que tenga cada vez un mayor desarrollo. Teniendo en cuenta lo anterior, es importante conocer el impacto de las emisiones de la huella de carbono atribuidas al uso del concreto, por lo tanto, se tiene como objetivo Determinar el impacto de la huella de carbono por medio de un análisis comparativo teniendo en cuenta la influencia de la especificación del concreto marca CEMEX, empresa que se ha enfocado en desarrollar materiales para la construcción y soluciones basadas en un profundo conocimiento y aplicación de la tecnología del concreto. Estas soluciones han logrado posicionar de una manera favorable a esa industria para lograr construcciones más sostenibles en el transcurso del tiempo para reducir las emisiones de CO_2 de su producto.

Metodología

La metodología consta de cuatro (4) fases, las cuales a su vez se subdividen en diferentes secciones presentadas en la siguiente figura.

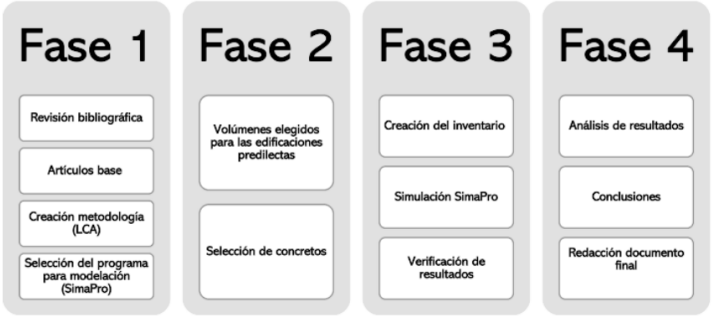


Figura 1. Fases de la metodología, **Fuente:** Autores ,2021.

Fase 1

Revisión bibliográfica-artículo base

Esta primera fase consistió en la selección de la metodología a implementar a partir de una revisión bibliográfica de estudios previos que abordaron el tema objeto de investigación. Como resultado se escogieron dos artículos.

En el primer estudio titulado "*Desempeño ambiental de estructuras de concreto ordinarias y de nueva generación: un análisis comparativo"* de los autores Wałach, Dybeł, Sagan, & Gicala, (2019) realizaron en primera instancia el análisis estructural de un edificio de 12 pisos a partir del Software *Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2013* empleando como variante diferentes tipos de hormigón HPC y HPSCC y un consumo permanente de acero de refuerzo. Los cálculos permitieron determinar las dimensiones geométricas de los elementos estructurales y el consumo de tipos particulares de hormigón en las soluciones analizadas.

En segundo lugar, con el fin de exponer el impacto sobre la huella de carbono, evaluaron las cargas ambientales asociadas a la comparación de varios concretos, describiendo el material o uso de energía según las emisiones de su entorno, para de esta forma, determinar el impacto ambiental y analizarlo. En esta investigación se tienen en cuenta características de resistencia, durabilidad y reología. Una de las conclusiones más relevantes del estudio fue que el uso de concreto de nueva generación de alta resistencia (HPSCC) permite una reducción del impacto ambiental total de la estructura mediante una disminución de la dimensión geométrica de la estructura, lo que se observa particularmente en las columnas. Adicionalmente, el alto indicador del impacto total del hormigón ordinario en el medio ambiente es causado por el efecto del calentamiento global (58,18% impacto total), el uso de agua dulce (22,65%), la acidificación (6,80%) y la emisión de residuos radiactivos (5,99%). Esto es causado principalmente por los procesos de producción de cemento (Walach, et. al ,2019, p.9).

El segundo articulo "La huella de carbono del hormigón normal y de alta resistencia utilizado en edificios de poca altura y gran altura" desarrollado por Fantilli, Mancinelli, & Chiaia, (2019) , analizaron y compararon los beneficios y desventajas ambientales que tiene el uso de un concreto de resistencia normal (NSC) frente a un concreto de alta resistencia (HSC) en edificios de baja, media y gran altura (14, 30 y 60 pisos respectivamente) considerando que en las construcciones las emisiones se encuentran en función tanto de la resistencia del concreto como de la altura del edificio. Para su ejecución se calculó la cantidad total de hormigón y el refuerzo necesario para satisfacer los requerimientos la construcción. El resultado anterior se multiplicó por las emisiones unitarias de CO_2 de los materiales y así se obtuvo el impacto global de la construcción.

Se dedujo que, para edificios de baja altura se genera un menor impacto con concreto NSC y para edificios de gran altura el uso de HSC se vuelve eficaz debido al volumen de los elementos estructurales que se reduce notablemente (Fantilli & Mancinelli, 2019).

Creación de la metodología- Metodología LCA: Definición de objetivos y ámbitos de aplicación

La metodología de valoración de análisis del ciclo de vida (LCA) se utilizará para la evaluación ambiental basada en ISO 14040 (2006) y en EN 15804 (2012), esta última consistente en la selección de tres categorías de indicadores de impacto ambiental. El objetivo de este estudio se centra en el impacto generado en la extracción de la materia prima, transporte y el consumo de energía para la producción de los concretos mencionados anteriormente en el documento. Para el desarrollo de esta metodología, se deben tener en cuenta que como Unidad funcional se tomara 1 m^3 de concreto con una resistencia a la compresión de 28 días, y cuyos límites del sistema y supuestos se presentan a continuación:

Límites del sistema:

Las etapas del ciclo de vida consideradas fueron (ver **Figura 2**):
Producción/extracción de las materias primas necesarias para la producción de cada concreto (A1).
Transporte de las materias primas (A2)
Producción de concreto (A3)
Aplicación (edificio)

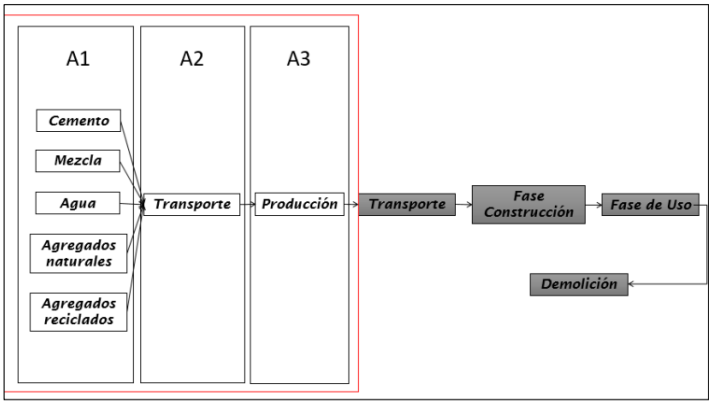


Figura 2. Límites del alcance del concreto. Alcance del estudio, tomado (Braga, Silvestre, & Brito, 2017).

Supuestos:

Solo se tienen en cuenta tres categorías de impacto: calentamiento global (GWP), agotamiento del ozono (ODP), acidificación (AP).
Algunas emisiones de diferentes etapas de producción / extracción de materias primas no se pueden contabilizar debido a la falta de información proporcionada. Sin embargo, se trata de emisiones que no suelen ser significativas ni medidas o consideradas en este tipo de estudios, evitando así un análisis de sensibilidad sobre este tema.
No se incluyen otras etapas del ciclo de vida del concreto (mantenimiento, considerando la durabilidad de las mezclas y demolición), ya que este estudio se centra en el impacto ambiental en cuanto a su clase de resistencia.
Algunos datos recolectados fueron estimados por la concretera nacional, otros se tomaron como referencia de las bases de datos del software SimaPro (Ecoinvent 3).

Selección del programa para modelación- Software SimaPro / Base de datos

Para obtener resultados precisos, el análisis se modelará en SimaPro. Cada sistema del proceso incluirá no solo el material que lo compone, también la energía necesaria y el transporte. El software SimaPro exige al usuario la definición de la biblioteca de ICV que desea disponer para la definición de los procesos y fases del sistema, así como la elección de la metodología para la realización de la evaluación de impacto del ciclo de vida.

Fase 2

Volúmenes elegidos para las edificaciones predilectas

Para este estudio, se decidió tomar los volúmenes referenciados en los artículos de Walach, et. al, (2019) y Fantilli & Mancinelli, (2019) los cuales simularon alturas de edificio de 12 pisos y 14,30,60 pisos respectivamente.

Selección de los concretos

Se analizaron un total de 8 tipos de concreto 4 de ellos seleccionados de artículos científicos y los restantes fueron escogidos por la empresa CEMEX. Es importante mencionar que los cuatro concretos, fueron seleccionados teniendo en cuenta que la resistencia concordara con las resistencias analizadas en los artículos base.

Fase 3

Creación del Inventario del Ciclo de Vida (LCI)

Es necesario recopilar todas las entradas y salidas de las fases consideradas para el análisis del ciclo de vida. Los datos del inventario (LCI) como las materias primas para la producción de concretos y los datos del diseño de mezcla para cada tipo de concreto (que incluyen cantidades de cemento, arena, grava, agua, superplastificante, plastificante y agregados) fueron aportados por la empresa. En cuanto a los volúmenes requeridos, se seleccionaron con base en los artículos (Fantilli, 2019) y (Walach, 2019). Adicional a ello, fue necesario en algunos casos, la creación de algunos productos en la base de datos Ecoinvent 3 de SimaPro.

Simulación SimaPro

Para la Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida (LCIA) se consideraron tres categorías ambientales: calentamiento global (GWP), agotamiento del ozono (ODP), acidificación (AP). Para obtener estos resultados, se utilizó el método estadístico EPD (2018) del SimaPro.

Fase 4

Análisis de resultados de la huella de carbono

Todas las materias primas y mezclas se estudiaron en términos de impacto ambiental utilizando el software SimaPro y la metodología LCA. En esta fase se hará un análisis comparativo de los resultados obtenidos representados mediante gráficas.

Resultados y discusión

El software SimaPro empleado utiliza como base de datos Ecoinvent 3 cuyo funcionamiento se basa en un modelo de atribución empleado para conocer los impactos ambientales en un ciclo de vida. En esta fase, una vez los datos del inventario son obtenidos, deben interpretarse, analizar y evaluar los impactos producidos por las cargas ambientales del producto. Es decir, deben expresarse los resultados numéricos a indicadores ambientales. En este caso, se utilizó el método estadístico EPD (2018) el cual fue seleccionado debido a que incluye el indicador ambiental principal de esta investigación, el indicador **Global Warming Potencial (GWP)** así como indicadores de **acidificación** (Efectos que tiene la contaminación atmosférica es la acidificación del medio ambiente principalmente generada por industrias), **eutroficación**(Aumento de nutrientes en el agua principalmente fósforo y nitrógeno), **oxidación fotoquímica** (Óxidos

de nitrógeno que reaccionan con compuestos orgánicos volátiles y producen ozono troposférico el cual es contaminante), **elementos de agotamiento abiótico** (Consumo de un recurso no fósil más rápido de lo que se puede reponer), **elementos de agotamiento abiótico incluyendo combustibles fósiles** (Consumo de un recurso fósil más rápido de lo que se puede reponer), **Uso neto del agua** (Cantidad de agua utilizada por los diferentes sectores en un período determinado y unidad espacial) y **agotamiento de la capa de ozono** (Cantidad de ozono estratosférico afectado debido a las acciones realizadas en el proyecto).

El análisis realizado correspondió a cuatro tipos de concretos denominados de la siguiente forma: Normal (NSC), Baja huella 1, Baja huella 2 y Baja huella HPSCC. En la **Tabla A.1** presentada en el Anexo se relacionan los materiales utilizados para la generación de $1m^3$ de los diferentes concretos con su correspondiente emisión de CO_2 por kg de producción. En adición, en la **Tabla A.2** se añade el diseño de mezcla de cada tipo de concreto.

Cabe resaltar que los concretos Normal, baja huella 1 y 2 tienen una resistencia de 40 MPa mientras que el concreto baja huella HPSCC una de 90 MPa, el aumento de resistencias genera un incremento significativo en los materiales proporcionados para la generación de $1m^3$. La diferencia de los concretos Normal, baja huella 1 y 2 es la emisión generada por cada uno de ellos, siendo la emisión del concreto Normal la mayor (100%), baja huella 1 ahorrando un 39% de emisión respecto a NSC y baja huella 2 un 50%, si comparamos la emisión del concreto HPSCC con el concreto Normal el HPSCC tendría una emisión menor del 38%, todo esto es básicamente generado por distintas mezclas de los materiales utilizados

Para esta investigación se debe tener en cuenta que se desarrollaron dos simulaciones por edificio (40 MPa y 90 MPa) con los volúmenes relacionados en la **Tabla A.3** para cada tipo de concreto, se observa que el volumen de concreto disminuye a medida que aumenta su resistencia con el concreto HPSCC. Para precisar el ahorro que puede ser generado al utilizar el concreto de alto rendimiento se hace el cálculo de porcentaje de disminución de volumen obteniéndose valores de 11,2%**,**17%, 29,5, 47,5 respectivamente para 12,14 ,30 y 60 pisos, es decir el ahorro en volumen tiende a ser directamente proporcional a medida que aumento el volumen utilizado. La pregunta realmente importante es ¿Qué tanto ahorro de CO_2 se puede generar al utilizar concreto de alta resistencia en cualquier tipo de construcción? A través de las simulaciones con la herramienta de SimaPro se logró obtener la tendencia que tiene el ahorro ambiental teniendo en cuenta área del edificio vs. Concreto normal- alto rendimiento.

Esta investigación se enfocó principalmente en el indicador ambiental potencial de calentamiento global (GWP) que expresa la cantidad de cambio en la radiación (calor) entrante o saliente de un sistema climático generado por la emisión de 1 kg de GEI integrado en el mismo horizonte temporal que provoca la liberación de 1 kg de CO_2. Las unidades en las se expresa son $kgCO_2$ equivalente. Inicialmente se hace la fase de introducción en el diseño del concreto con el fin de saber de dónde proviene la mayor fuente de emisión del concreto, lo cual se destaca en el siguiente diagrama.

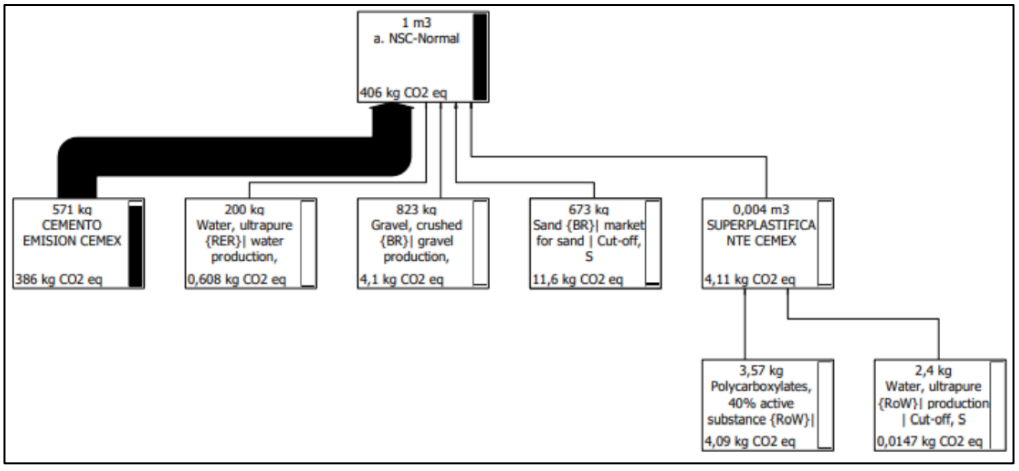


Figura 3. Diagrama de flujo del concreto Normal-NSC. **Fuente:** Autores ,2021.

En el diagrama se observa cómo el cemento emite aproximadamente el 95% del total del CO_2 en la producción de 1kg de concreto Normal-NSC. Este comportamiento es similar en los demás concretos analizados, los porcentajes de cada uno de estos se describen en la siguiente Tabla.

Tabla 1. Emisión generada por el cemento en cada concreto Bogotá, Colombia.

	Emisión CO_2 kg	**NSC**	**Baja Huella 1**	**Baja huella 2**	**Baja huella HPSCC**
Emisión generada por el cemento en el concreto	0.901	95%	90%	93%	90%

Fuente: *Autores, (2021).*

Prosiguiendo, se hizo la simulación de los edificios, los resultados obtenidos por el software se presentan de dos formas, la primera mediante gráficas de barras en la cual se resalta con un recuadro naranja el indicador GWP (Se aclara que los colores no en todas las gráficas representan el mismo concreto), y la otra forma es a partir de una tabla numérica con los resultados obtenidos a través del software SimaPro. Cabe mencionar que mediante el análisis realizado por SimaPro en las gráficas presentadas a continuación genera una normalización respecto al valor máximo.

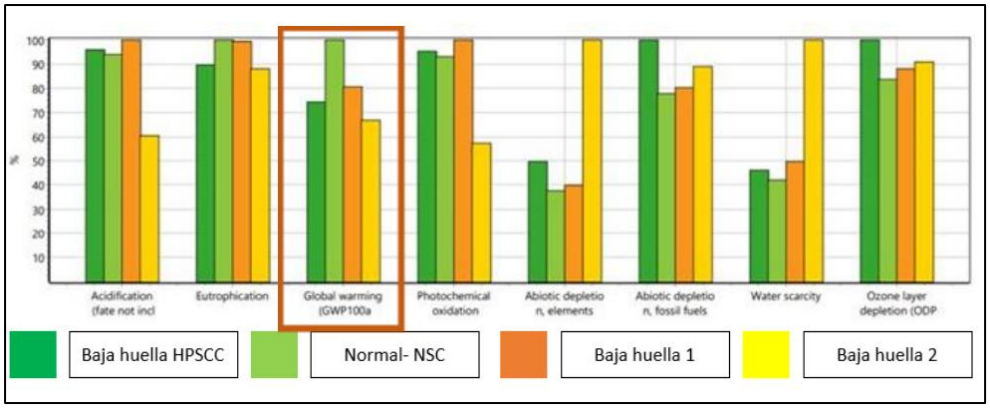


Figura 4. Un edificio- 12 pisos. Bogotá, Colombia. **Fuente:** Autores ,2021.

Para un edificio de 12 pisos como primera configuración de análisis se realiza a un volumen de 2.643m^3 y una resistencia de 40 MPa, como segunda un volumen de 2.348 m^3 para una resistencia de 90 MPa, se encontró que el concreto Normal-NSC genera la mayor emisión con una diferencia del 42 % frente a un concreto tipo baja huella 2.

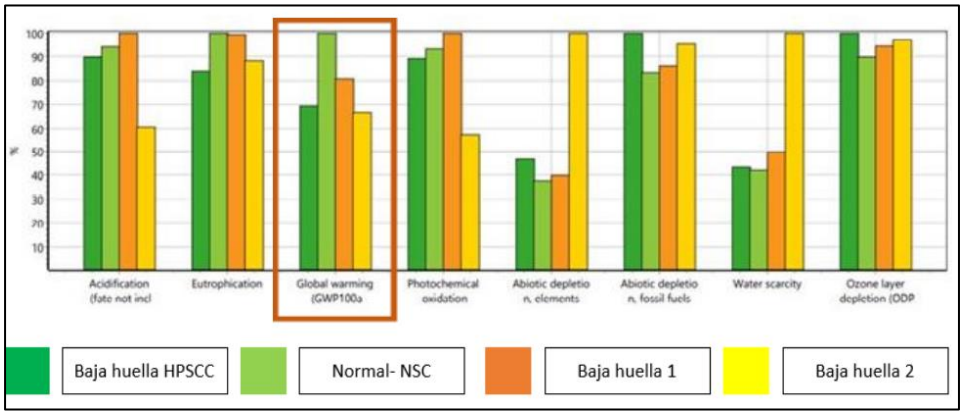


Figura 5. Tres edificios- 14 pisos. Bogotá, Colombia. **Fuente:** Autores ,2021.

Para el segundo edificio de 14 pisos y un volumen de 4.414 m^3 para una resistencia de 40 MPa y un 3.665 m^3 para una resistencia de 90 MPa, se halló que la tedencia del concreto Normal- NSC sigue siendo la mayor y que, aunque el resultado y diferencia entre los concretos Baja huella HPSCC y Baja huella 2 es pequeño (de tan solo el 2%) sigue siendo hasta este punto la mejor opción el concreto Baja huella 2.

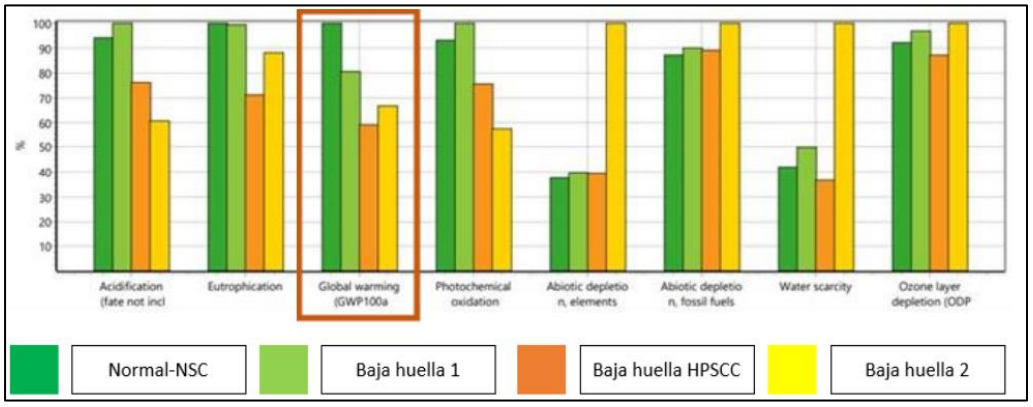


Figura 6. Tres edificios - 30 pisos. Bogotá, Colombia. **Fuente:** Autores, (2021).

Para la simulación del edificio de 30 pisos y volúmenes de 16.725m^3 de una resistencia de 40 MPa y 11.788m^3 de 90 MPa, valor máximo continúa siendo para el concreto Normal-NSC la diferencia en este caso se observa en el valor mínimo que correspondería para el concreto de Baja huella HPSCC obteniendo una diferencia del 41% frente al concreto normal. En esta gráfica se puede observar la diferencia en los valores del concreto Baja huella 2 y Baja huella HPSCC aumenta en un 8%.

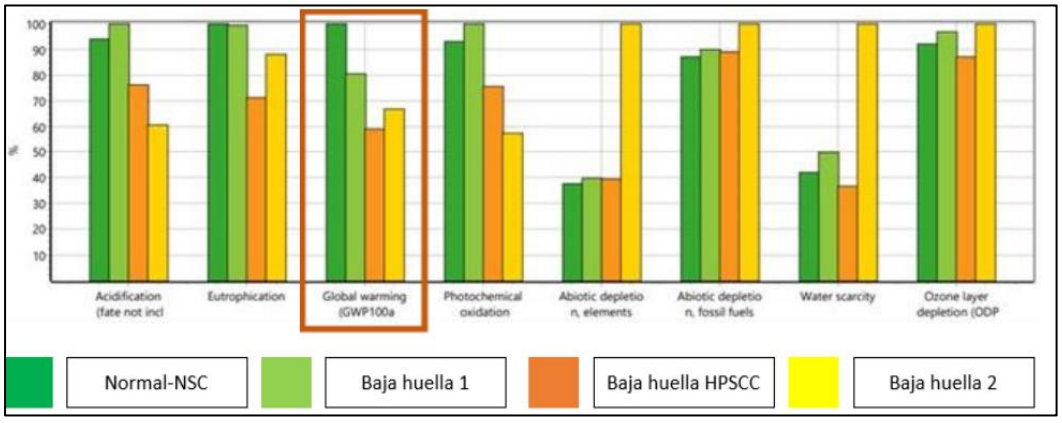


Figura 7. Análisis edificio de 60 pisos. Bogotá, Colombia. **Fuente:** Autores, (2021).

Por último, se encuentra el edificio de 60 pisos con un volumen de 30.417 m^3 para una resistencia de 40 MPa y 15.982 m^3 para una de 90 MPa. En este diseño se confirma que el concreto con mayor emisión en todos es el concreto NSC; y manteniéndose como menor emisor de CO_2 se encuentra al concreto Baja huella HPSCC, con una diferencia con el concreto Baja huella 2 del 23%. Para comprender con mayor exactitud las gráficas anteriormente expuestas, SimaPro arroja valores numéricos los cuales fueron tenidos en cuenta para el presente estudio, en la siguiente tabla se observa la emisión que genera la edificación de cada edificio con su correspondiente concreto. Subrayados se encuentran los valores mínimos de emisión por edificio.

Tabla 2. Datos obtenidos del software SimaPro. Bogotá, Colombia.

Autores articulo	Edificio	NSC	Baja huella 1	Baja huella 2	Baja huella HPSCC
Wałach D & Dybeł P. & Sagan J. & Gicala M.	12 pisos	1.073.257	863.966	**715.500**	796.577
Fantilli, O. Mancinelli, B. Chiaia	14 pisos	1.792.416	1.442.885	**1.194.936**	1.243.380
	30 pisos	6.791.609	5.467.208	4.527.708	**3.999.172**
	60 pisos	12.351.591	9.942.964	8.234.338	**5.422.019**

Fuente: *Autores, (2021).*

Igualmente, se hizo una normalización respecto al valor más alto de emisión generada. En este caso se normalizó respecto a los resultados del concreto normal el cual en todos los casos fue el que mayor emisión generó. En la siguiente tabla se presentan subrayados los porcentajes mínimos, es decir, a los concretos con porcentajes de menor emisión.

Tabla 3. Normalización de resultados. Bogotá, Colombia.

Autores articulo	Edificio	NSC	Baja huella 1	Baja huella 2	Baja huella HPSCC
Wałach D & Dybeł P. & Sagan J. & Gicala M.	12 pisos	100%	63%	**52%**	58%
Fantilli, O. Mancinelli, B. Chiaia	14 pisos	100%	80%	**67%**	69%
	30 pisos	100%	80%	67%	**59%**
	60 pisos	100%	80%	67%	44%

Fuente: *Autores, (2021).*

Lo anterior permite corroborar la información vista en las gráficas presentadas previamente. Con los edificios de más bajo volumen (12 y 14 pisos) es más eficiente construir con el concreto Baja huella 2 y en los edificios más altos (30 y 60 pisos) es más eficaz construir con el concreto Baja huella HPSCC. Lo anterior, permite deducir que entre más alto sea el edificio es conveniente utilizar un concreto de alta resistencia para lograr disminuir el volumen del concreto a utilizar, así como ventajas en aspectos ambientales con la disminución de emisiones de CO_2.

Por otra parte, teniendo en cuenta que el sector cementero representa aproximadamente el 8 % de las emisiones de CO_2 en la atmósfera, se considera que en cualquiera que fuese el caso de un edificio de 12, 14, 30 o 60 pisos se puede llegar a lograr un ahorro de emisiones de CO_2 de como mínimo un 33 % teniendo en cuenta la diferencia entre emisiones de concreto NSC (100%) y Baja huella 2(67%) (Véase **Tabla 3**). En el edificio de 60 pisos utilizando los concretos marca Cemex de bajas emisiones de huella de carbono, como máximo podríamos tener un ahorro de hasta el 56 % si se observa la diferencia utilizando el concreto HPSCC (44%) y el normal NSC (100%). Dados los resultados anteriores se resalta la necesidad de que, en la fase de prefactibilidad de un proyecto tener en cuenta la parte estructural- económico y ambiental a corto, medio y largo plazo para poder generar conclusiones sustanciales para la reducción de las emisiones derivadas del uso de cemento y el concreto en los edificios.

Finalmente, cabe resaltar una contraposición por parte del estudio *"Desempeño ambiental de estructuras de concreto ordinarias y de nueva generación: un análisis comparativo*" teniendo que los autores Wałach, Dybeł, Sagan, & Gicala, (2019) concluyen

que para un edificio de altura de 12 pisos es mejor utilizar el concreto de alta resistencia debido al ahorro estructural que se genera. Sin embargo, en la presente investigación se demuestra lo contrario, es decir, es mejor utilizar el concreto Baja Huella 2 con resistencia normal de 40 MPa, esto sujeto al diseño que tiene en el momento la empresa CEMEX. En el caso del artículo *La huella de carbono del hormigón normal y de alta resistencia utilizado en edificios de poca altura y gran altura*" desarrollado por Fantilli, Mancinelli, & Chiaia, (2019) se reitera que para los edificios de poca altura (12 y14 pisos), se puede asegurar el impacto más bajo usando concreto de resistencia normal y para edificios altos (30 y 60 pisos) se genera un mejor desempeño ambiental utilizando concreto de ultra alta resistencia".

Conclusiones

• A partir de la bibliografía consultada, se extrajeron algunas metodologías aplicables al proyecto, en este caso se usó como metodología un análisis comparativo, donde se tienen en cuenta métodos del análisis de ciclo de vida para medir los impactos de un producto, en este caso, fue el concreto. Para su desarrollo se utilizó el software SimaPro 9.1 para evaluar y verificar el desempeño general del producto. El LCA se realizó de acuerdo con el marco y las normas establecidas por la ISO 14040 y las bases de datos utilizadas fueron Ecoinvent 3.0.

• Se elaboró la simulación en el software SimaPro, de cuatro edificios de diferentes áreas y con cuatro concretos, en los cuales varió la característica de la resistencia (40 MPa y 90 MPa), esto con base en los artículos previamente estudiados en la bibliografía y se utilizaron los concretos específicos de la empresa con el fin de obtener un resultado nacional.

• Se concluyó que para los edificios de más bajo volumen o área (12 y 14 pisos) es más eficaz el uso del concreto Baja huella 2, el cual tiene una resistencia de 40 MPa, es óptimo utilizar este concreto debido al ahorro de CO2 que sería emitido, siendo menor en un 48% y 33% respectivamente, lo cual indica que, si un constructor decide hacer un edificio de, por ejemplo, 12 pisos, pueden llegar a ahorrar hasta un 48% de emisión de CO_2. En los edificios altos (30 y 60 pisos) se confirmó que se hace un ahorro ambiental significativo cuando se construyen con el concreto Baja huella HPSCC, que tiene una resistencia de 90 MPa, este resultado es atribuido al ahorro volumétrico que se hace en la construcción principalmente de las columnas; en este caso se ahorra el 41% y 56% de emisión de CO_2 a la atmósfera. Este trabajo contribuyó al estudio de la selección de concretos más sostenibles. A partir de los resultados finales obtenidos, fue posible definir los concretos más y menos ventajosos desde el punto de vista medioambiental y estructural. Estos resultados se dedujeron gracias a la simulación hecha en el software SimaPro, el cual al ingresar los distintos tipos de concreto en las cuatro simulaciones de edificaciones evaluó el impacto en los indicadores ambientales enfocados en las emisiones de CO_2.

Referencias bibliográficas

Adesina, A. (2020). Recent advances in the concrete industry to reduce its carbon dioxide emissions. *Environmental Challenges*. doi **:** **https://doi.org/10.1016/j.envc.2020.100004**
Braga, A., Silvestre, J., & Brito, J. d. (2017). Compared environmental and economic impact from cradle to gate of concrete with natural and recycled coarse aggregates. *Journal of cleaner Productio*, 529-543. doi: **https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.057**
Cement Association of Canada. (2021). *The Cement and Concrete Industry*. Acceso 25 de mayo de 2021, obtenido de: **Cement and Concrete Industry Overview - Cement Association of Canada**
DANE. (2019). *Indicadores Económicos alrededor de la Construcción*. Acceso 25 de mayo de 2021, obtenido de : **Indicadores económicos alrededor de la construcción (dane.gov.co)**
Fantilli, A., & Mancinelli, O. (2019). The carbon footprint of normal and high-strength concrete used in low-rise and high-rise buildings. *Sciencie Direct.* doi : **https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00296**
Wałach, D., Dybeł, P., Sagan, J., & Gicala, M. (2019). Environmental performance of ordinary and new generation concrete structures a comparative analysis. *Research Gate*, 1-12.doi: **10.1007/s11356-018-3804-2**

Tabla A.1. Materiales del concreto y su emisión. Bogotá, Colombia.

Material	**Emisión CO_2 kg**
Cemento (kg)	0.901
Ceniza volante (kg)	0.002
Humo de sílice	0.004
Agua (kg)	0.000
Grava ½ "(kg)	0.007
Arena (kg)	0.018
Plastificante(kg)	0.000
Superplastificante (kg)	0.001

Fuente: *Autores, (2021).*

Tabla A.2 Diseño de concretos. Bogotá, Colombia

Material	**Concreto**			
	Normal	Baja huella 1	Baja huella 2	Baja huella HPSCC
Cemento (kg)	571.4	452.1	361.7	456.8
Ceniza volante (kg)	0	0	90.4	85.6
Humo de sílice	-	-	-	28.5
Agua (kg)	200	185.3	185	150
Grava ½ "(kg)	822.6	835.4	819.1	716.4
Arena (kg)	673	802.6	787	875.6
Plastificante(kg)	2.8	2.2	1.6	0
Superplastificante (kg)	4	2.4	2.7	6.2

Fuente: *Autores, (2021).*

Tabla A.3. Cantidad de concreto necesaria por resistencia y edificio. Bogotá, Colombia

Concreto	**Resistencia (Mpa)**	**Volumen de concreto (m^3)**			
		Autor			
		(Walach,2019)	(Fantilli, 2019)	(Fantilli,2019)	(Fantilli, 2019)
		12 pisos	14 pisos	30 pisos	60 pisos
Normal	40	2.643	4.414	16.725	30.417
Baja huella 1	40	2.643	4.414	16.725	30.417
Baja huella 2	40	2.643	4.414	16.725	30.417
Baja huella HPSCC	90	2.348	3.665	11.788	15.982

Fuente: *Autores, (2021).*

Tabla A.4. Porcentaje de disminución de volumen al utilizar HPSCC. Bogotá, Colombia.

Autores, # de pisos	**Wałach D & Dybeł P. & Sagan J. & Gicala M. 12 pisos**	**Fantilli, O. Mancinelli, B. Chiaia 14 pisos**	**Fantilli, O. Mancinelli, B. Chiaia 30 pisos**	**Fantilli, O. Mancinelli, B. Chiaia 60 pisos**
Disminución de volumen (%)	11.2	17	29.5	47.5

Fuente: *Autores, (2021).*

ACODAL
ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
65° CONGRESO INTERNACIONAL
Agua, Saneamiento, Ambiente y Energías Renovables
Bogotá - Colombia
Centro de Convenciones Ágora
Julio 13, 14 y 15 de 2022

Percepciones y Estrategias Asertivas de Comunicación del Cambio Climático en Colombia

J.F. Mendez-Espinosa[1*], J.S. Larrahondo-Cruz[2], M. Espinosa-Valderrama[2], D.V. Cortes-Castillo[1], V.F. Forero-Ausique[1], J.F. Franco-Ramírez[2]

[1] Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente - ECAPMA, Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD, Bogotá, Colombia.
[2] Hill Consulting, Bogotá, Colombia.
[*] Autor corresponsal: Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Transversal 31 # 12 - 38 sur, Bogotá. Colombia. Email: juanf.mendez@unad.edu.co

Abstract

Climate change communication (CC) is a transversal instrument to overcome the main social, economic, and environmental challenges associated with CC in Colombia. However, there are no policies or research on this topic at the national level. Therefore, this research aimed to analyze a population sample of 1066 people (IC: 95%, 3% error) from different regions and sociodemographic conditions between 2020 and 2021 to identify the best communication strategies according to their perception of CC. This, based on the "Global Warming's Six Americas" (GWSA) methodology of Yale University and George Mason University. Likewise, the perceptions about causes and impacts associated with extreme weather events were identified. The individual actions, collective actions, and perceptions about public policies to reduce CC were analyzed. The CC perception results show that people are mainly alarmed (84%), concerned (14%) and cautious (2%). Less than 1% is doubtful and dismissive about CC. The results of this research are valuable inputs to generate climate action strategies in Colombia.

Keywords: Citizen involvement, Climate change perception, Environmental policy, Strategies of communication

Resumen

La comunicación del cambio climático (CC) es un instrumento transversal para superar los principales desafíos sociales, económicos y ambientales asociados al CC en Colombia. Sin embargo, no existen políticas o investigaciones sobre este tema a nivel nacional. Por lo tanto, esta investigación tuvo como objetivo analizar una muestra poblacional de 1066 personas (C.I 95%, 3% error) de diferentes regiones y condiciones sociodemográficas entre 2020 y 2021 para identificar las mejores estrategias de comunicación según su percepción del CC. Esto, con base en la metodología "Global Warming's Six Americas" (GWSA) de la universidad de Yale y la universidad de George Mason. Así mismo, esta investigación permitió identificar percepciones sobre las causas e impactos asociados a los fenómenos meteorológicos extremos, e identificar acciones individuales, colectivas y percepciones sobre las políticas públicas para reducir el CC. Los resultados de percepción del CC muestran que las personas están principalmente alarmadas (84%), preocupadas (14%) y cautelosas (2%). Menos del 1% es dudosa y displicente. Los resultados de esta investigación son un insumo valioso para generar estrategias focalizadas de acción climática en Colombia.

Palabras clave: Estrategias de comunicación, Participación ciudadana, Percepción del cambio climático, Política ambiental

Introducción

Causas y consecuencias del cambio climático

De acuerdo con la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) el Cambio climático (CC) presenta una modificación en el patrón natural de cambio (Naciones Unidas, 1992) en una ventana de análisis de más de 30 años. Esta anomalía es atribuida directa o indirectamente a la actividad humana (Figura 1) ya que ha generado un desbalance energético. Esto ha conllevado a la intensificación, frecuencia y duración de eventos climáticos alrededor del mundo con efectos negativos que ponen en riesgo la supervivencia de todas las especies como el ser humano (Figura 1). Por ello, es necesario considerar que el CC necesita de un compromiso individual y colectivo, más allá de las intervenciones desde los sectores público y privado, para poder llevar a buen término las acciones en mitigación y adaptación. Esto, considerando que desde las acciones individuales se logran impactos significativos en reducción de

emisiones de contaminantes climáticos y al logro de la adaptación colectiva (Wynes & Nicholas, 2017), desde la ética , la igualdad y la paz. Sin embargo, para lograrlo es preponderante su correcta comunicación entendiendo que esta se debe generar en función de la percepción que tiene el individuo sobre el CC y sus particularidades sociodemográficas.

Figura 1. Generalidades de las causas y consecuencias del cambio climático

Fuente: autores a partir de (IPCC, 2014).

Categorías de segmentación poblacional según su percepción sobre el cambio climático

Estudios en Alemania (Metag et al., 2017) e India (Leiserowitz, A., Thaker, J., Feinberg, G., & Cooper, 2013) han desarrollado categorías que segmentan su población en función de su percepción frente al cambio climático. Esto, con el fin de identificar las mejores estrategias de comunicación del CC de forma particular. En contraste, Australia (Morrison et al., 2013), Brasil (Instituto de Tecnologia & Sociedade do Rio, 2021) y Portugal (estudio no publicado) han replicado las categorías propuestas por investigadores de Estados Unidos para analizar su población nacional (Yale Program on Climate Change Communication, 2020). Existen algunas posibles ventajas al desarrollar categorías de segmentación propias como tener en cuenta las diferencias socioculturales y contextos entre países y su relación con las diversas opiniones de la población frente al cambio climático. Sin embargo, existen limitaciones de mayor peso como el alto costo asociado a estudios presenciales que brinden y garanticen una representatividad de la extensa y variada población, así mismo, tener categorías de segmentación específicas para cada país dificulta la comparación de resultados entre países.

Por las razones expuestas anteriormente, en este estudio se consideraron las categorías de segmentación de la metodología original (Chryst et al., 2018) para identificar las mejores estrategias de comunicación del cambio climático. Esta segmentación se basa en la percepción del público frente al calentamiento global (Figura 2). Dicha segmentación presenta seis categorías que permiten categorizar a la población según su entendimiento sobre este fenómeno y su grado de preocupación sobre el mismo. En este sentido, las categorías consideradas son:

Figura 2. Segmentación de la población según percepción del cambio climático

Fuente: autores a partir de (Yale University, 2021)

Metodología

Este es un estudio exploratorio en el que se buscó categorizar la muestra población en función de su percepción frente al cambio climático basado en la metodología GWSA de la universidad de Yale y la universidad de George Mason. A partir de su agrupación por categorías (alarmados, cautelosos, desvinculados, dudosos, displicentes) se identificaron las mejores estrategias de comunicación del CC. Así mismo, se analizaron sus condiciones sociodemográficas, su percepción sobre causas y e impactos por fenómenos meteorológicos extremos, así como su mirada frente acciones individuales y colectivas para afrontar el cambio climático.

Participantes y muestra

El presente proyecto piloto se enfocó en la comunidad de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), incluyendo su personal administrativo, docentes y estudiantes (171,211 personas en 2021). Esto permitió considerar la percepción de personas de diferentes regiones y contextos sociodemográficos del país. Así mismo, esta apuesta se generó por: (a.) las condiciones actuales de pandemia por COVID-19, (b.) la posibilidad de llegar a todo el territorio mediado por la tecnología de la información y la comunicación, (c.) el costo, (d.) posibles sesgos, (e.) y la baja seguridad relacionada con un estudio presencial. La muestra objetivo-planteada fue de 1061 personas (nivel de confianza del 95%, error del 3%). En total se obtuvieron 1066 respuestas completas. La encuesta online aplicada inicio el 22 de septiembre de 2021 y finalizo el 31 de enero de 2022.

Diseño y análisis de encuesta de percepción

El estudio de percepción se desarrolló a través de un cuestionario individual en línea de 24 preguntas con un tiempo de respuesta aproximado de 12 minutos. La encuesta conto con 4 módulos:

1. Condiciones sociodemográficas de la población de estudio, en el cual se consideraron preguntas sobre grupo étnico, tipo de área {urbano-rural}, departamento/región, género, rango de edad, nivel de escolaridad, ingreso promedio por familia
2. Creencias y posturas de los encuestados sobre el CC. En este módulo se incluyeron preguntas fundamentales para clasificar o segmentar la población en las siguientes categorías de percepción del CC: alarmados, preocupados, cautelosos, desvinculados, dudosos y displicentes. Esto, a partir de la metodología estandarizada “Global Warming’s “Six Americas Short Survey”: Audience

Segmentation of Climate Change Views Using a Four Question Instrument" (Chryst et al., 2018).

3. Percepciones de causas e impactos asociados con eventos climáticos. A partir de este modulo se indagó sobre las principales problemáticas ambientales, sociales y económicas que pudiesen estar relacionadas con fenómenos meteorológicos extremos
4. Acciones individuales, colectivas y políticas públicas para reducir el CC. Este modulo tenia como objetivo identificar si la población participa en actividades que pueden reducir las emisiones de contaminantes climáticos. En este módulo se incluyó una pregunta abierta sobre la intención de vincularse o apoyar actividades para afrontar la mitigación y/o adaptación al cambio climático.

Las categorías poblacionales obtenidas en función de su percepción del CC fueron analizadas por contraste con sus condiciones sociodemográficas, su perspectiva sobre las causas y consecuencias de los fenómenos meteorológicos extremos, así como con su mirada frente a acciones individuales y colectivas para afrontar el CC.

Resultados y discusión

Segmentación poblacional nacional según su percepción sobre el cambio climático

La comunicación eficiente del CC se caracteriza por priorizar mensajes que abarcan las causas y soluciones (United Nations Climate Change, 2019), la conexión entre los saberes locales y conceptos científicos (Alianza Clima y Desarrollo, 2019) y fundamentalmente por establecer estrategias según la percepción del CC. Los resultados (Figura 3) muestran las estrategias de comunicación para: (a.) los más informados: alarmados (83.77%) y preocupados (14.07%), y (b.) las categorías tendientes al negacionismo: cautelosos (1.97%), desvinculados (0%), dudosos (0.09%) y displicentes (0.09%). Es decir, aquellos con un posible mecanismo de defensa por mensajes o noticias amenazantes y deprimentes con consecuencias sin salida o ajenas, que no muestran las soluciones desde la cotidianidad o que lo exponen como un asunto intangible meramente ambiental (Meira, 2009; Moser, 2008).

Figura 3. Estrategias de comunicación del cambio climático para las categorías identificas dentro de la muestra

Fuente: autores a partir de (Yale University, 2021)

Es importante mencionar que de forma transversal los mensajes para comunicar el CC deben considerar ser: simples (para lograr efectividad), inesperados (para lograr mayor atención), concretos (para lograr entendimiento y recordación), creíbles (para lograr persuasión), emocionantes (para lograr impacto), y que incluyan ejemplos nacionales y locales para mostrar ejemplificación a partir de la acción (Yale University, 2021). Así mismo, se debe considerar promover el consenso científico y evitar la polarización política (Yale University, 2021).

Condiciones sociodemográficas

Colombia es un país variado por diferentes aspectos: (a.) grupos étnicos: indígena, gitano o Rrom, Raizal del archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, Palenquero de San Basilio, Negro, mulato, afrodescendiente, afrocolombiano; (b.) configuración del territorio: urbana, rural; (c.) la pluralidad de regiones: Bogotá D.C, Caribe, Pacífico, Central, Amazonia/Orinoquia. Así mismo, se puede decir que se encuentran diferentes géneros (masculino, femenino, transgénero, sin definir), personas de todas las edades, especialmente jóvenes adultos (25 – 44 años), así como diferentes niveles de escolaridad e ingreso mensual por hogar. A pesar de estas diferencias los resultados mostraron que, a excepción de 2 casos puntuales, los encuestados (n=1066) tendieron a tener una percepción en torno al CC principalmente alarmada (n=893), seguida por preocupada (n=150) y cautelosa (n=21). Los casos atípicos asociados a una percepción dudosa y otra displicente del CC no presentaron condiciones únicas y diferenciales por las cuales se podría explicar este comportamiento. Sin embargo, puede llegar a ser muy importante profundizar en el estudio sobre las tendencias negacionistas del CC en Colombia.

Al analizar la proporción de personas alarmadas por condición sociodemográfica (v.g., grupo étnico, región, entre otros) se encontró que 96.88% de los indígenas fueron agrupados en esta categoría, valor 10% mayor respecto a otros grupos étnicos. Así mismo, se encontró que la zona rural mantuvo una proporción de alarmados 2% mayor en comparación a las zonas urbanas. Los resultados igualmente muestran que solo en la zona urbana se presentó una percepción dudosa y displicente. Este patrón también se evidencio a nivel regional donde se encontró que Bogotá presento la proporción más baja (79.81%) de alarmados, mientras que la región del pacífico presento la más alta (90.68%). Por otro lado, se evidencio que entre quienes presentan los ingresos mensuales por hogar más altos se obtuvo la proporción más baja de alarmados (73.68%) comparada con la participación en ingresos inferiores (75% - 87%). Cabe señalar que el CC puede llegar a impactar en mayor medida a aquellos que menor capacidad de adaptación tienen (IPCC, 2014). Por ello, es propicio comunicar el CC desde la capacidad individual y colectiva para adaptarnos considerando principalmente soluciones basadas en la naturaleza, la construcción y la tecnología.

Percepciones sobre las causas e impactos asociados a los fenómenos meteorológicos extremos

En todos los segmentos de la población, excepto para los dudosos y desvinculados, existe un consenso en que la consecuencia más prolongada, intensa y frecuente de los

eventos climáticos extremos en sus municipios es el incremento del precio de los alimentos. Para más de la mitad de los encuestados, los desenlaces que le siguen en prioridad son la contaminación del aire junto con las sequías y las inundaciones. Por otra parte, solo el 10% de los encuestados relaciona las pérdidas de vidas como una consecuencia por eventos climáticos.

De manera general, se encontró que los alarmados, preocupados y cautelosos están de acuerdo en que todas las acciones que podrían contribuir negativamente al cambio climático (mal manejo de basuras, deforestación, mal manejo del agua, contaminación del aire, malas prácticas agropecuarias, malas prácticas industriales, pérdida de especies de animales o plantas y planeación del territorio sin áreas verdes), se han vuelto más frecuentes en la última década. Aproximadamente el 75% de la población percibe que la pérdida de especies de animales y plantas es la acción que más ha aumentado en los últimos 10 años (Figura 4).

Respecto a los efectos climáticos locales, los alarmados, preocupados y cautelosos están de acuerdo en que en la última década se han incrementado los siguientes efectos: escasez de agua, incendios forestales, aumento y cambios abruptos en la temperatura, lluvia severa, erosión del suelo, inundaciones, deslizamientos de tierra, aumento del nivel del mar y día en tus fuertes. De todos estos, los cambios abruptos en la temperatura son el efecto dominante según la opinión del 88% de la población encuestada.

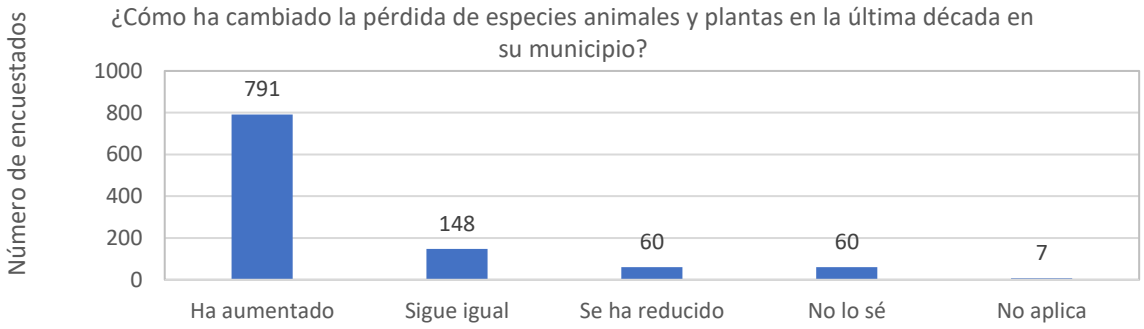


Figura 4. Opinión respecto a cambios en la pérdida de especies animales y plantas en la última década en el municipio de residencia

Acciones individuales, colectivas y políticas públicas para reducir el cambio climático

La mayoría de los encuestados (entre el 50% y el 88%) dice hacer un uso moderado de la energía y el agua en los hogares, como parte de las principales acciones que han emprendido. Por otra parte, dentro de las acciones menos populares se encontraron: (a.) el involucrarse en campañas ambientales y (b.) el optar por modos de transporte limpios para mitigar el cambio climático (Tabla 1).

Tabla 1. Acciones personales para reducir el cambio climático ejecutadas en los últimos doce meses por los encuestados (n=1066)

Acción	Proporción de encuestados
Uso moderado del agua en el hogar	87.52%
Uso moderado de la energía en el hogar	80.67%
Reducir y clasificar la basura generada en el hogar	72.13%
Uso de transporte público, caminata o bicicleta diariamente	45.87%
Participar en campañas para proteger el medio ambiente	34.89%
Preferir usar medios de transporte limpios	19.51%
Otra*	0.51%

Otra: alimentación con baja huella de carbono, plantación de árboles, educación ambiental, conservación medioambiental, gestión sostenible de los plásticos, reducción de impresiones diarias

Casi la mitad de la población encuestada reportó no tener ningún conocimiento de las iniciativas sobre CC impulsadas por sus alcaldías, de hecho, sólo el 8.44% de las personas encuestadas dicen conocerlas (Figura 5). Sin embargo, 8 de cada 10 personas tienen voluntad para participar en campañas de mitigación de gases efecto invernadero o adaptación al cambio climático. Asimismo, 8 de cada 10 personas consideran que el cambio climático debe tener una prioridad alta dentro de los planes de desarrollo de sus municipios.

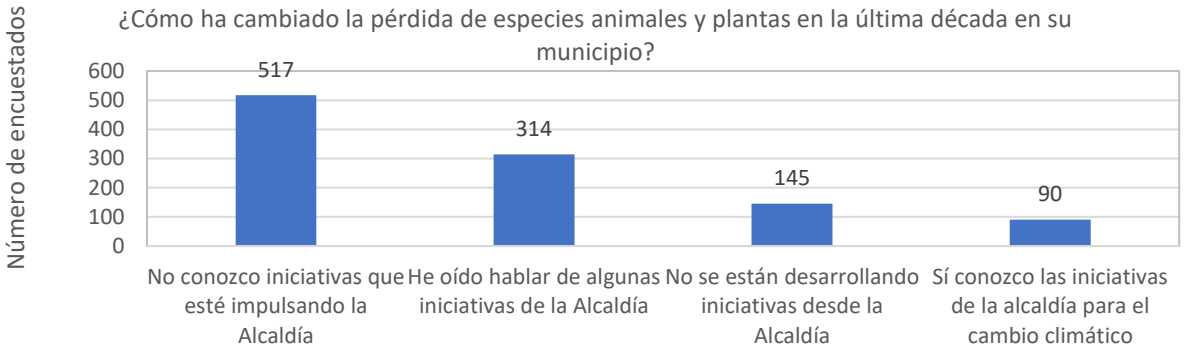


Figura 5. Conocimiento de los encuestados de iniciativas que impulsan sus alcaldías para combatir el cambio climático

Por otra parte, en contraste con la mayoría de los alarmados y preocupados, un poco más de la mitad de los cautelosos reportó no considerar las iniciativas medioambientales de los candidatos al momento de votar; aunque la mayoría le atribuye alta prioridad al CC en los planes de desarrollo de sus municipios. Este grupo reportó tener la menor disposición respecto a los alarmados y preocupados para involucrarse en actividades relacionadas con la acción climática.

Frente a la pregunta: “describa brevemente el tipo de actividades en las que le gustaría vincularse o apoyar” los encuestados respondieron que están dispuestas a realizar principalmente acciones para el adecuado manejo de los recursos naturales (v.g., el agua), la gestión de residuos sólidos, la siembra de árboles, y la reducción del consumo de energía (Figura 6).

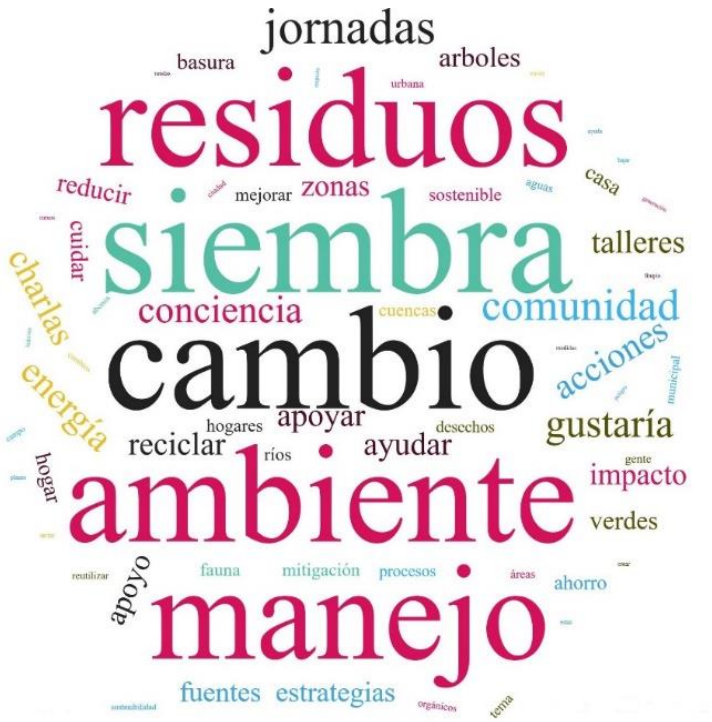


Figura 6. Nube de palabras sobre la intención de apoyar actividades para afrontar la mitigación y/o adaptación al cambio climático.

Conclusiones

La construcción de políticas públicas para la asertiva comunicación del cambio climático en Colombia debe caracterizarse por establecer estrategias según la percepción del CC. Aunque en todas las regiones se mantuvo una perspectiva principalmente alarmada y preocupada se debe garantizar un mensaje diferenciador que permita la conexión entre los saberes de la zona y los conceptos científicos.

A pesar de las diferentes y variadas condiciones sociodemográficas en Colombia la población objetivo tendió a mantener una percepción del CC principalmente alarmada y preocupada (97.85%). De acuerdo con Meira (2009), para disminuir la percepción cautelosa, desvinculante y dudosa del CC (<3%) se debe garantizar el fomento de mensajes sobre cobeneficios de la acción climática tanto individuales como colectivas en diferentes contextos (v.g., salud, económicos, de identidad nacional, entre otros).

La consecuencia más prolongada, intensa y frecuente de los eventos climáticos extremos para la población encuestada es el incremento del precio de los alimentos en los municipios, además de las sequías y las inundaciones, mientras que la pérdida de vidas es la eventualidad menos asociada a los eventos climáticos extremos. Los "alarmados, preocupados y cautelosos" están de acuerdo en que todas las acciones que contribuyen negativamente al cambio climático se han vuelto más frecuentes en la última década, especialmente la pérdida de especies animales y plantas. Asimismo, estos sectores coinciden en que múltiples efectos climáticos se han incrementado durante la última década, mayoritariamente los cambios abruptos en la temperatura.

La mayoría de encuestados afirma haber buscado un uso moderado de la energía y el agua en los hogares durante el último año, mientras que sólo una minoría reportó involucrarse en campañas ambientales y optar por el uso del transporte limpio como medidas de mitigación del cambio climático.

Cerca de la mitad de la población encuestada no tiene conocimiento de las iniciativas sobre cambio climático que impulsan sus alcaldías y sólo una minoría puede afirmar conocerlas concretamente. Sin embargo, la mayoría de las personas tiene la voluntad para participar en campañas de acción climática y opinan que se deberá atribuir una alta prioridad para este tema dentro de los planes de desarrollo de sus municipios.

Este tipo de encuestas provee información útil para el diseño de estrategias de educación y comunicación que serán elementos habilitantes para el logro de la política nacional de cambio climático y de la meta definida al 2030 para reducir las emisiones de contaminantes climáticos en al menos un 51%.

Referencias bibliográficas

Chryst, B., Marlon, J., van der Linden, S., Leiserowitz, A., Maibach, E., & Roser-Renouf, C. (2018). Global Warming's "Six Americas Short Survey": Audience Segmentation of Climate Change Views Using a Four Question Instrument. *Environmental Communication*, *12*(8), 1109–1122. https://doi.org/10.1080/17524032.2018.1508047

Instituto de Tecnologia & Sociedade do Rio. (2021). *Brazilian citizen's perception towards Climate Change 2021*. https://en.percepcaoclimatica.com.br/edicao-2021-mudancas-climaticas-na-percepcao-dos-brasileiros

IPCC. (2014). AR5 Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability — IPCC. In *Intergovernmental Panel on Climate Change*. https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/

Leiserowitz, A., Thaker, J., Feinberg, G., & Cooper, D. (2013). (2013). *Global Warming's Six Indias: an audience segmentation analysis*. *Global Warming's Six Indias. Yale University. New Haven*, *CT: Yale Project on Climate Change Communication*.

Meira, P. A. (2009). *Comunicar el Cambio Climático. Escenario social y líneas de actuación*. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino - Organismo Autónomo de Parques Nacionales.

Metag, J., Füchslin, T., & Schäfer, M. S. (2017). Global warming's five Germanys: A typology of Germans' views on climate change and patterns of media use and information. *Public Understanding of Science*, *26*(4), 434–451. https://doi.org/10.1177/0963662515592558

Morrison, M., Duncan, R., Sherley, C., & Parton, K. (2013). A comparison between attitudes to climate change in Australia and the United States. *Australasian Journal of Environmental Management*, *20*(2), 87–100. https://doi.org/10.1080/14486563.2012.762946

Moser, S. C. (2008). More bad news: The risk of neglecting emotional responses to climate change information | OpenSky. In *Creating a Climate for Change: Communicating Climate Change and Facilitating Social Change* (pp. 64–80). Copyright 2008 Cambridge University Press.

Naciones Unidas. (1992). *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*.

Wynes, S., & Nicholas, K. A. (2017). The climate mitigation gap: Education and government recommendations miss the most effective individual actions. *Environmental Research Letters*, *12*(7), 74024. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa7541

Yale Program on Climate Change Communication. (2020). *Global Warming's Six Americas - Yale Program on Climate Change Communication*. Yale University .

Yale University. (2021, April 2). *Yale Program on Climate Change Communication*. Yale School of the Environment. https://climatecommunication.yale.edu/

ACODAL
ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
65° CONGRESO INTERNACIONAL
Agua, Saneamiento, Ambiente y Energías Renovables
Bogotá - Colombia
Centro de Convenciones Ágora
Julio 13, 14 y 15 de 2022

Zonificación de la Amenaza por Avenidas Torrenciales en la Quebrada La Parroquia del Municipio de Fusagasugá a partir de la Modelación Bidimensional en el Software ÍBER

Daniela Moreno Gualtero[1], Juanita Torres Montaño[1], Julio Cesar Ramírez Rodriguez[1*]

[1]Facultad de Ingeniería, Universidad de La Salle.
**Autor corresponsal:* Cundinamarca, Universidad de La Salle, Carrera 5 # 59A 44 – Candelaria, Bogotá D.C. Colombia. Email: jcramirez@unisalle.edu.co

ABSTRACT

As a result of the accelerated population growth and the lack of planning and management of cities, communities have settled in risk areas. In order to contribute to knowledge in decision-making for prevention and land management, the municipality of Fusagasuga, Cundinamarca, which has been the epicenter of major natural disasters such as the one that occurred on October 14, 2014, where a torrential flood event affected the population, the economy and the infrastructure of the municipality, is placed as a case study. Therefore, the general objective was to zone the torrential flood hazard in the La Parroquia stream and, for that reason, based on information from secondary sources, geoprocessing of information and statistical analysis of data, carry out the hydraulic model in Iber software. The development of the project took into account three stages: first, the collection of information, then the numerical modeling and, finally, the hazard zoning. As a result, 4 return periods were modeled (2, 10, 25 and 50 years) and 4 variables were analyzed (velocity, depth, intensity and sediment). The hazard map showed that 27.27% of the flood-prone areas corresponded to low hazard, 66.85% to medium hazard and 5.87% to high hazard.

Keywords: Flood, Floods, Hazard, IBER, Sediments

ACODAL
ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
65° CONGRESO INTERNACIONAL
Agua, Saneamiento, Ambiente y Energías Renovables
Bogotá - Colombia
Centro de Convenciones Ágora
Julio 13, 14 y 15 de 2022

ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES EN LA QUEBRADA LA PARROQUIA DEL MUNICIPIO DE FUSAGASUGÁ A PARTIR DE LA MODELACIÓN BIDIMENSIONAL EN EL SOFTWARE ÍBER

RESUMEN

Como resultado del crecimiento acelerado de la población y la ausencia de planificación y ordenamiento de las ciudades, ha ocasionado el asentamiento de las comunidades en zonas de riesgo. En pro de aportar al conocimiento en la toma de decisiones de prevención y gestión del territorio se sitúa como caso de estudio al municipio de Fusagasuga, Cundinamarca, el cual ha sido epicentro de importantes desastres naturales como lo ocurrido el 14 de octubre de 2014, en donde un evento de avenidas torrenciales afectó a la población, la economía y la infraestructura del municipio. Por lo tanto, se planteó como objetivo general zonificar la amenaza por avenidas torrenciales en la quebrada La Parroquia y, por ese motivo, a partir de información de fuentes secundarias, geoprocesamiento de información y análisis estadístico de datos, llevar a cabo el modelo hidráulico en el software Iber. El desarrollo del proyecto tuvo en cuenta tres etapas, en primer lugar, la recopilación de la información, después la modelación numérica y, finalmente, la zonificación de amenaza. Como resultado, se modelaron 4 periodos de retorno (2, 10, 25 y 50 años) y se analizaron 4 variables (velocidad, profundidad, intensidad y sedimentos). En el mapa de amenaza se determinó que de las áreas inundables el 27.27% correspondió a amenaza baja, el 66.85 % a amenaza media y el 5.87 % a amenaza alta.

Palabras clave: Amenaza, Avenida-torrencial, Flujos, IBER, Sedimentos.

Introducción

De acuerdo con la Revista Colombiana de Geografía las avenidas torrenciales son una de las amenazas de origen hidrometeorológico con mayor capacidad destructiva en términos de vidas humanas y pérdidas económicas, especialmente en ambientes montañosos y tropicales como Colombia. Sin embargo, no existe en el país un consenso con respecto a la clasificación y terminología de eventos tipo flujos que permitan caracterizar adecuadamente estos fenómenos Eider, Isabel, & Ingrid, (2020). Particularmente, este proyecto se sitúa en el municipio de Fusagasugá, Cundinamarca, en donde según la base de datos de Desinventar se registran más de 16 inundaciones desde 1938, eventos de gran magnitud como el

de 1981, afectaciones en la temporada invernal de 2010-2011 y, en octubre de 2014 una emergencia por una avenida torrencial en la quebrada La Parroquia que dejó como saldo la muerte de 1 habitante y numerosas pérdidas económicas. A partir de esto, entidades públicas y privadas, han establecido que parte del municipio es susceptible a sufrir afectaciones por avenidas torrenciales.

En vista de lo anterior, se propuso como objetivo general del proyecto: zonificar las áreas de amenaza a partir de una modelación bidimensional por avenidas torrenciales en la quebrada La Parroquia, haciendo uso del software Íber 2.5.2. Para dar cumplimiento de lo estipulado se establecieron 3 fases. La primera, consistió en una caracterización general del Cerro Fusacatán y del área de influencia de la quebrada en la zona urbana del municipio. Paralelamente, se llevó a cabo el procesamiento de la información hidrológica y la determinación de caudales para los periodos de retorno de 2, 10, 25 y 50 años. La segunda fase, consistió en el desarrollo de la modelación bidimensional, obteniendo mapas (profundidad, velocidad, concentración de sedimentos e intensidad de la inundación) tipo ráster que fueron procesados en Sistemas de Información Geográfica (SIG). Finalmente, en la última fase, se estableció la amenaza siguiendo la Guía Metodológica para la Elaboración de Planes Departamentales de Gestión del Riesgo, al igual que se validaron los resultados de las áreas afectadas con estudios realizados por entidades gubernamentales como la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), el Servicio Geológico Colombiano y universidades regionales.

Metodología

Este proyecto se desarrolló en tres fases, dando respuesta a los objetivos planteados de esta propuesta:

Fase 1. Recopilación y procesamiento de información

La fase inicial consiste en la recopilación de información referente a la caracterización de parámetros topográficos, hidrológicos, geológicos y geomorfológicos de la quebrada La Parroquia, a partir de documentos técnicos oficiales, específicamente, la Corporación Autónoma Regional (CAR), el Servicio Geológico Colombiano (SGC), Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) así como las reglamentaciones vigentes consignadas en los Planes y/o Esquemas de Ordenamiento Territorial del municipio de Fusagasugá.

Seguidamente, para el tratamiento y análisis de los datos hidrológicos la metodología trazada es la siguiente (Figura 1 y 2):

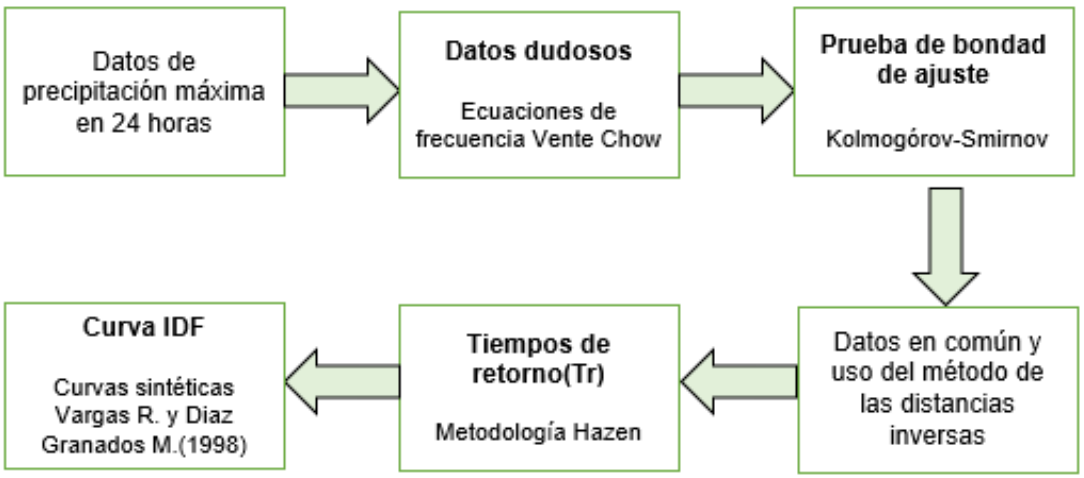


Figura 1. Metodología análisis de datos de precipitación. Elaborado por Autores,2021.

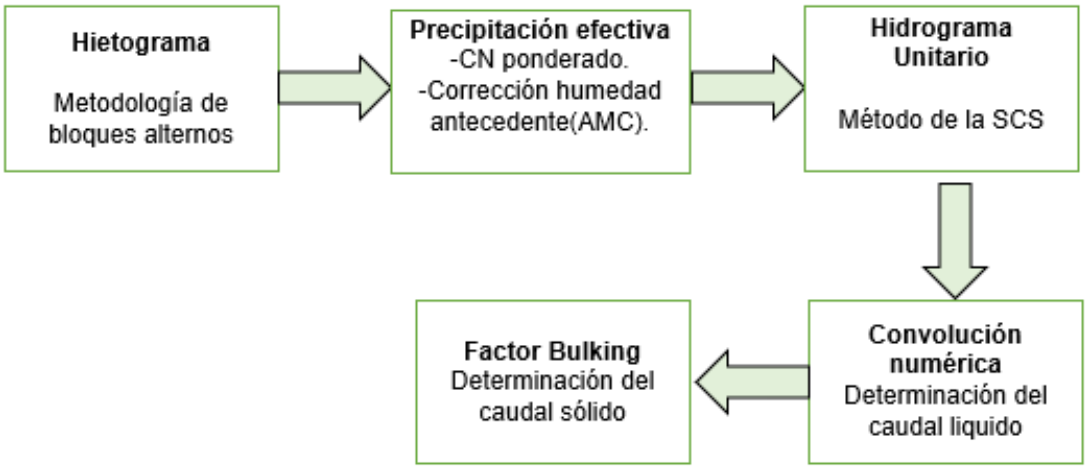


Figura 2. Metodología determinación de hidrogramas de caudal líquido y sólido. Elaborado por Autores,2021.

Por su parte, la metodología para la obtención del modelo digital de elevación del terreno (DEM) se presenta en la **Figura 3**.

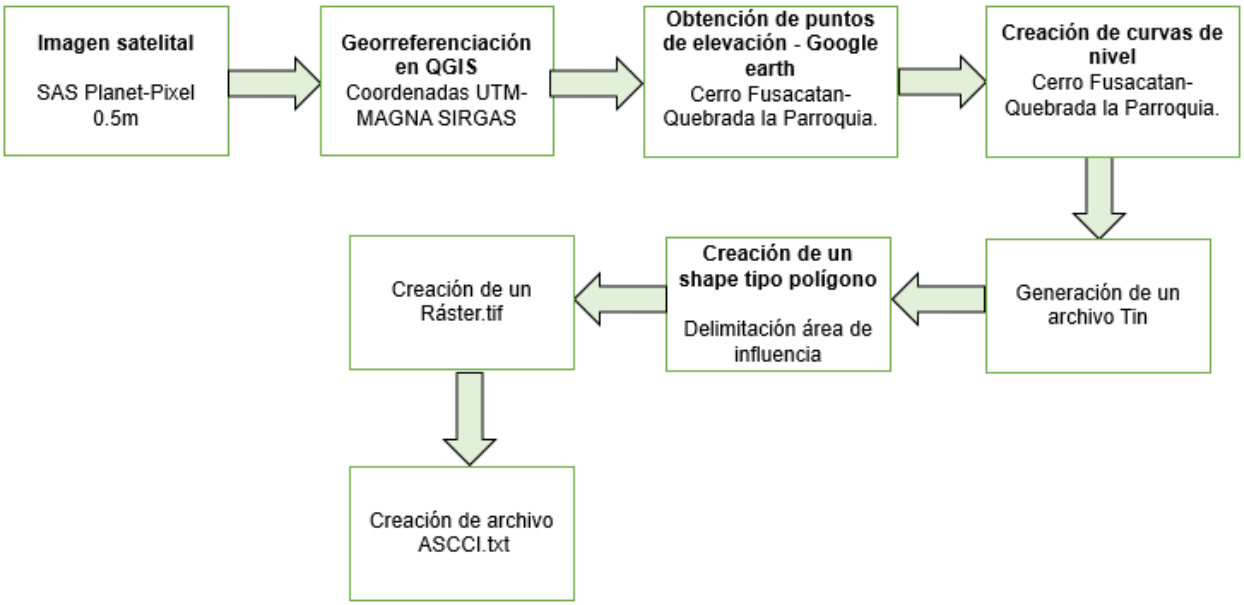


Figura 3. Metodología para la elaboración del Modelo Digital de elevación. Elaborado por Autores,2021.

Fase 2. Modelación matemática

Para la modelación en el Software Iber 2.5.2 se deben tener en cuenta los productos resultantes de la fase anterior, y en adición, los aspectos relacionados en la **Figura 4**.

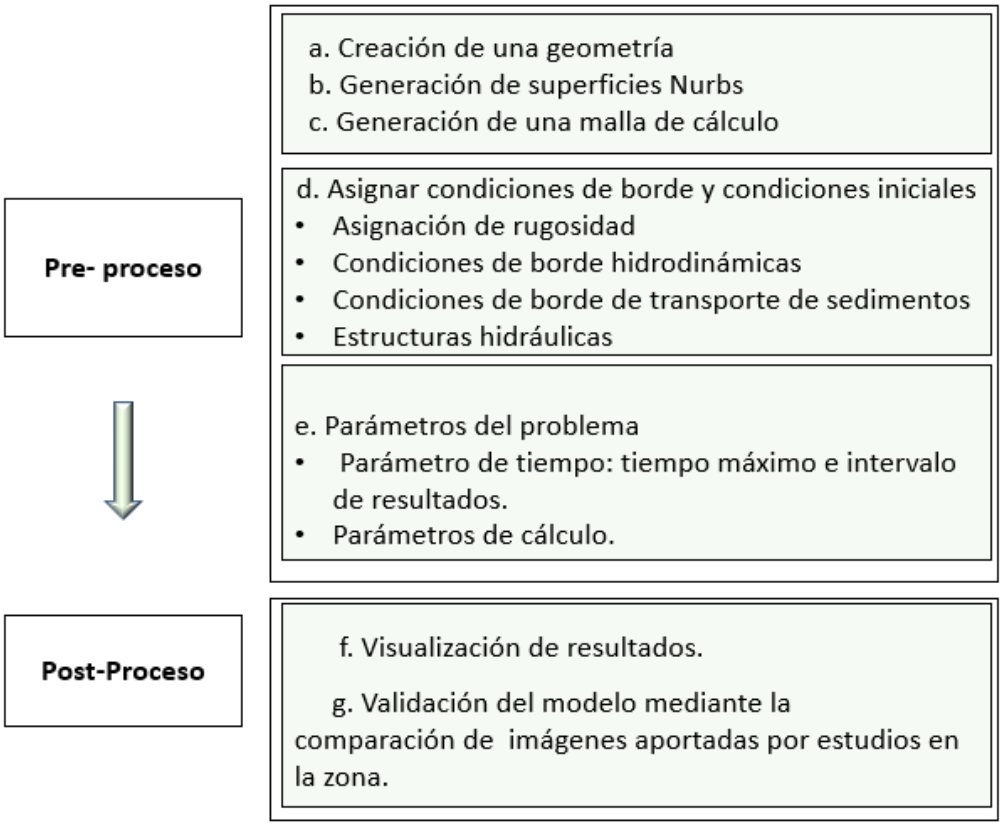


Figura 4. Metodología modelación Software Iber 2.5.2. Elaborado por Autores,2021.

Fase 3. Zonificación de la amenaza

Este análisis se desarrollará siguiendo la Guía metodológica para la elaboración de Planes Departamentales de Gestión del Riesgo UNGRD, (2012), que clasifica la amenaza como la sumatoria de la frecuencia, la intensidad y la extensión del territorio afectación evaluados en una escala de 1 a 3. Por último, la clasificación de la amenaza se realiza entre los intervalos de (1-3) amenaza baja (4-6) amenaza media, y (7-9) amenaza alta.

$$\boldsymbol{Amenaza}(\boldsymbol{A}) = Intensidad(I) + Frecuencia(F) + territorio\ afectado(T)$$

(Ecuación 1)

Resultados y discusión

La **Figura 5** evidencia que las áreas por amenaza media sobresalen con un 66,85% (39,93 Ha), luego, con un 27,27% (16,29 Ha) se relacionan los territorios con amenaza baja y finalmente, siguiendo los resultados de las variables modeladas anteriormente descritas, se corrobora que los territorios que representan mayor amenaza (3,51 Ha) con un 5,87%, (ver **Tabla 1**) son los que abarcan la Av. Las Palmas-Calle 8, y los alrededores de la calle 9 y la calle 10, la Plaza de Mercado central, la estación de Bomberos, la Planta de potabilización -PEKIN, del municipio, Escuela Camilo Torres y Colegio La Presentación. De manera que, se considera que la mayoría de estas edificaciones son de gran relevancia, dado que, ante la ocurrencia de un evento, son indispensables para la atención inmediata de comunidades.

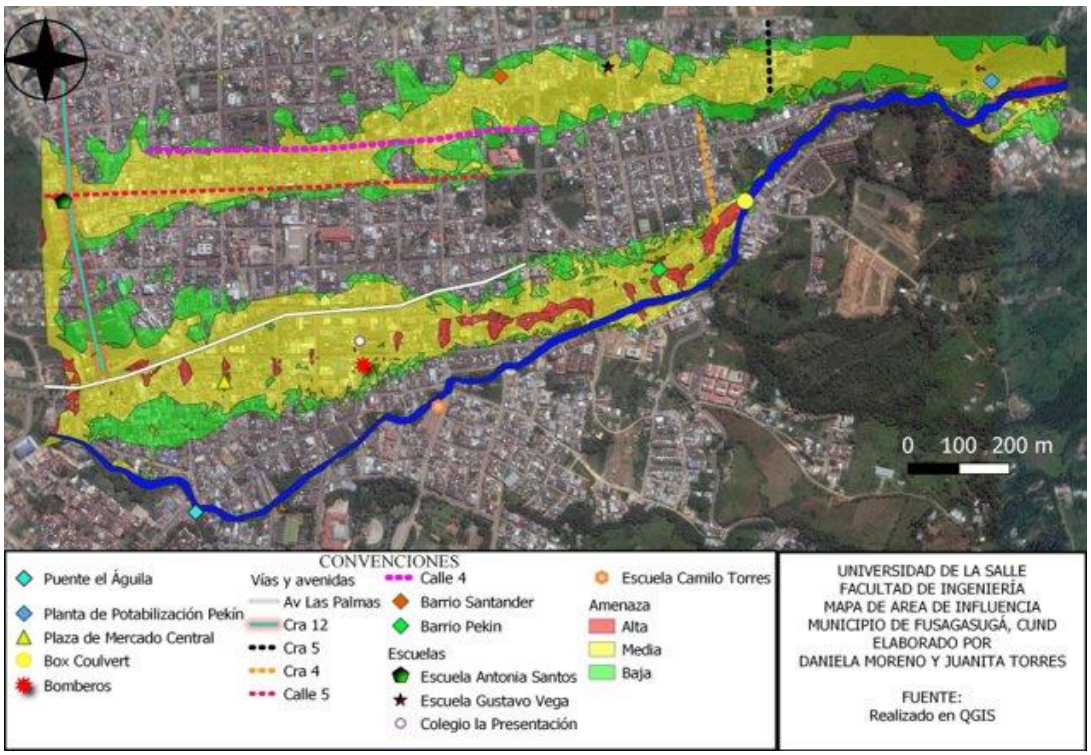


Figura 5. Mapa de amenaza por avenidas torrenciales. Elaborado por Autores,2021.

Tabla1. Área de amenaza.

Amenaza	**Área(ha)**	**%**
Baja	16.29	27,27
Media	39.93	66,85
Alta	3.51	5,87
Total	59.73	100

Nota. Elaborado por Autores, 2021.

A continuación, en la **Tabla 2** se presentan los resultados obtenidos para los parámetros evaluados en el software por cada uno de los periodos de retorno.

Tabla 2. Resultados de Parámetros máximos

Parámetro	**2**	**10**	**25**	**50**
Velocidad (m/s)	10.8	14.9	15.1	16.5
Profundidad (m)	2,7	3,36	3,72	3,76
Sedimentos(g/L)	1199	1248	1070,4	983

Nota. Las profundidades máximas se registran aguas abajo (Pte. del Águila) por un deprimido que sufre el cauce de la quebrada. Elaborado por Autores, 2021.

Dentro de los fenómenos hidrogeológicos ha existido mucha incertidumbre sobre la asignación concreta de una definición que vislumbre cómo se origina y cuáles son las características de las avenidas torrenciales. Cada evento puede variar su comportamiento a razón de numerosos factores que varían en función de la geología, hidrología, ubicación geográfica entre otros. En consecuencia, distintas fuentes teóricas difieren en algunos aspectos sobre este fenómeno, por este motivo se hace el ejercicio de complementar y corroborar desde diversos puntos de vista, las condiciones que definen el evento de avenida torrencial en la quebrada la Parroquia.

La susceptibilidad de ocurrencia de la avenida torrencial en la quebrada se presenta debido a:

- ✓ Tamaño de la cuenca -usualmente se da en cuencas pequeñas (0.3 y 150 km^2).
- ✓ Carácter súbito.
- ✓ Cambios de pendiente pronunciados.
- ✓ Altas velocidades y corta duración de desarrollo.
- ✓ Frecuencia de recurrencia baja en una misma localización.
- ✓ Generación de flujos con grandes cantidades de sedimentos, material de arrastre (detritos y troncos).
- ✓ Aguaceros frecuentes, altas intensidades y duraciones.
- ✓ Geomorfología: zonas montañosas, escarpadas y de piedemonte.

Con respecto al tipo de flujo, los resultados de la modelación aluden variaciones en la densidad del flujo a lo largo de toda el área afectada por la avenida torrencial, relacionadas con los cambios de pendiente, y el Efecto Bulle (vórtice localizado en la bifurcación del cauce principal). Igualmente, todos los periodos de retorno analizados, las zonas de la ronda hídrica de la quebrada, y desde la Cra 5 hasta la Cra 12 cruzando por el barrio Santander, se identifican concentraciones que varían desde los 295 hasta los 1248 g/l, es decir concentraciones volumétricas (Cv) que corresponderían respectivamente al 11 y al 47%. En vista de que no existe un consenso entre los límites que diferencian un tipo flujo a otro, se recalca que de acuerdo con García, MacArthu, French, & Miller, (2008) los valores registrados en estas zonas corresponderían a un flujo hiperconcentrado, mientras que la Watershed Protection District; WEST Consultants, Inc, (2011) los clasificaría tanto como flujo hiperconcentrado como un flujo de corriente normal.

Para complementar, se enfatiza que los principales procesos morfodinámicos en la Cuenca de La Quebrada La Parroquia corresponden a deslizamientos y flujos que ocurren generalmente en la unidad de Colinas Redondeadas, la cual, por su carácter litológico predominantemente de grano fino, es susceptible a erosión concentrada y fenómenos de remoción en masa. Si bien las principales características estructurales y litológicas del Grupo Guadalupe en la Zona de estudio evidencian que ningún bloque de gran tamaño descendió de esta unidad geológica durante el evento de flujo hiper concentrado ocurrido en 2014 gracias a la estabilidad de los taludes. Se puede establecer que, sí hubo Re-movilización de bloques de menores tamaños propios de la formación de lodolitas de Fusagasugá (Depósitos de vertiente sobre trabajados (Ddvrs)), depósitos caracterizados por contener en general rocas detríticas de origen sedimentario.

Área de afectación

Es necesario recalcar que en la modelación no se llevó a cabo una calibración del modelo a falta de información primaria, es decir, tomada en campo. Por lo tanto, se desarrolló una validación de los resultados obtenidos de cada parámetro con estudios y proyectos realizados en la zona por diferentes entidades.

La modelación indicó un primer desbordamiento (Suroccidental) hacia el barrio Pekín, afectando el Box Culvert cuya sección de 1,2 m por 2 m, produjo que la estructura se obstruyera, dada su capacidad hidráulica insuficiente. Luego, sigue su curso hacia la calle novena y la Av. La Palmas, dentro de las zonas con calificación de amenaza alta en este tramo se encuentran localizadas la Estación de Bomberos y la Plaza de mercado Central. Este sector coincide con lo presentado por la CAR en la **Figura 6**, donde elaboraron el mapa que delimita el desbordamiento ocurrido en la emergencia de octubre de 2014, así mismo, esta área se registra en el mapa de la **Figura 7** realizado por Sarmiento & Rodriguez, (2018) a partir de un análisis multitemporal del cambio del cauce para los años 1951, 1988, 1996 y 2010, donde determinan los predios susceptibles por fenómenos de inundación a causa del desbordamiento de la Quebrada la Parroquia. Por último, Sarmiento & Pura, (2017) trazan en el mapa de la **Figura 8** los mismos sectores de las zonas inundables elaborados a partir de teledetección y encuestas municipales. No obstante, cada análisis difiere de la zonificación de ciertas áreas, precisamente por las metodologías utilizadas.

En contraste, con la modelación en iber se definió un segundo desbordamiento desde el sector de Sta. María de los Ángeles hasta la Cra 12 con Cll 3. En esta zona se encontró un canal de derivación del cauce principal que se extiende por el margen noroccidental del área influencia, y es detallado en la fotografía tomada en campo (**Figura 9**). De hecho, la formación de los dos tramos descritos se da gracias a un comportamiento bifurcado, cuyas propiedades hidrodinámicas del flujo (froude cercano 1, y ondas superficiales) dificultan la expansión de la creciente, es decir, se desarrolla en 1 sola dirección y, en consecuencia, imposibilita la formación completa del cono de deyección o el abanico aluvial Ordoñez (2021).

Con base en lo anterior, y considerando la geomorfología descrita en capítulos anteriores, se puede afirmar que tanto el drenaje en el sector de Sta. María de los Ángeles como el cauce principal de la quebrada la Parroquia se encuentran en zonas inundables que yacen dentro del abanico fluviotorrencial, en la que actualmente se encuentra la unidad Planos y cantos de rellenos antrópicos, este fundamento responde al comportamiento esperado sobre esta zona de área de influencia.

Velocidad

En la **Figura 10** se registran altas velocidades particularmente a lo largo del lecho de la quebrada, a raíz de secciones estrechas en algunos tramos del cauce y a cambios de pendiente considerables. Al mismo tiempo, se observan para todos los periodos de retorno altas velocidades en las vías principales y calles secundarias del municipio, producto del aumento de superficies impermeables.

A pesar de que no se encontraron registros de velocidad cuantitativos en estudios y reportes históricos de los eventos de lluvias intensos, se describen flujos de media a altas velocidades tanto en el cauce principal como en la zona urbana. De manera que, con el proyecto se aportan valores de velocidades máximas (10,8 14.9, 15.1 y 16.5 m/s respectivamente para los periodos de retorno 2,10,25 y 50 años) cuyos rangos se encuentran dentro del margen cualitativo señalados en los reportes del Servicio Geológico Colombiano y CAR.

Las variaciones en la velocidad se encuentran relacionadas con parámetros como la pendiente y la fricción de fondo, la cual tiene un doble efecto en las ecuaciones que rigieron la modelación, ya que, por un lado, producen una fuerza de fricción que se opone a la velocidad media, y por el otro, producen turbulencia.

Profundidad

El documento de la CAR relaciona de manera generalizada que en el área de influencia el nivel del agua no superó los 30 cm, sin embargo, con la modelación realizada, la mayoría de las profundidades alcanzadas para todos los periodos de retorno son menores de 100cm. Es decir, si bien ambas afirmaciones son semejantes, se debería considerar que las profundidades podrían ser 70cm más altas, lo cual es de gran relevancia en el momento de establecer estrategias para la mitigación de riesgos.

Sedimentos

El comportamiento de las concentraciones de sedimentos producido en la modelación varía en función de la pendiente, la rugosidad y el vórtice generado por el cambio de dirección. Por este motivo se aprecian tres tendencias en la parte superior del área de influencia:

- ✓ Inicio (pendiente alta) la concentración de sedimentos es mayor por el potencial de re-suspensión.
- ✓ Luego, el flujo se encuentra con la zona urbana, de manera que tanto su energía como su concentración disminuyen.

- ✓ Finalmente, al llegar aguas abajo el material empieza a depositarse, indicando un aumento de sedimentos por unidad de volumen.

El vórtice generado por el cambio de dirección hace parte del fenómeno denominado *Bullé*, el cual se presenta de forma local en una bifurcación como lo representa en la modelación. La curvatura que se presenta entre el cauce principal y brazo secundario es precisamente la que origina la formación de la espiral o el vórtice. Adicionalmente, en el fondo de la bifurcación, el flujo de agua va orientado hacia el brazo secundario, mientras que el flujo de la superficie se dirige hacia el cauce principal. De esta manera, debido a que la concentración de sedimento en el fondo es mayor que la concentración de sedimento cerca de la superficie del agua, se transportará más sedimento en el brazo que en el cauce principal, es decir, la quebrada La Parroquia.

Para explicar mejor la analogía del efecto *bullé* con los resultados del modelo, se elaboró un mapa (**Figura 11**) que simboliza dicha bifurcación, siendo el brazo secundario el que se extiende sobre el costado norte de oriente a occidente, desarrollándose finalmente como un abanico fluviotorrencial.

De lo anterior, se corrobora que la forma del abanico fluviotorrencial coincide con las áreas inundables obtenidas en el modelo desde la zona de transporte hasta la zona del cono de depositación como lo refiere (Suarez, 2009).En particular hacia la garganta se localizan las unidades de Ar y Faa.

Ahora, vale la pena analizar que las modelaciones demuestran similitudes con los estudios de los eventos torrenciales presentados en el municipio. La CAR menciona que las secciones media y baja de la cuenca poseen depósitos cuaternarios (Q_1 y Q_3) con un espesor de 5m, cuyos primeros 80 cm pertenecen a suelos transportados con abundante materia orgánica. Gracias a esto y a la deforestación sobre el cauce, al presentarse eventos con crecientes súbitas, se favorece el tránsito de material terrígeno, raíces, troncos, entre otros materiales.

Mas adelante, en la zona suburbana se reconoce que además del fenómeno anterior, hay removilización de detritos de distintos tamaños propios del depósito cuaternario Q_2 (ubicados al fondo del cauce) constituidos por bloques y cantos subangulares y subrendondeados (ver **Figura 12**).

Conclusiones

- ✓ Gracias a la recopilación de fuentes secundarias, al geoprocesamiento de datos, y al tratamiento estadístico y analítico, fue factible modelar el fenómeno de avenida torrencial en la quebrada la Parroquia para establecer el grado de amenaza, validando los resultados del modelo con estudios previos desarrollados por la CAR y el SGC.
- ✓ La combinación de características físicas e intervención antrópica en la quebrada la Parroquia potencian la ocurrencia de avenidas torrenciales gracias a su geología (formación lodolitas de Fusagasugá, depósitos aluviales, depósitos cuaternarios), hidrología (precipitaciones constantes e intensas), geomorfología (unidad abanico Fluvio torrencial), cobertura y usos del suelo (vegetación discontinua, pastos limpios, bosques fragmentados, tejido urbano discontinuo), ocasionando una amenaza sobre el área urbana de Fusagasugá.
- ✓ El área urbana total afectada fue de 59,72 Ha, de las cuales el 27.27%, correspondió a amenaza baja, el 66.85 % a amenaza media y el porcentaje restante de 5.87% a amenaza alta, en particular se evidencia la afectación de estructuras de importancia municipal como la Planta de Potabilización Pekín, la estación de bomberos, instituciones educativas (Escuela Camilo Torres y Colegio La Presentación), Plaza de mercado central y vías principales como la Av.Las Palmas.
- ✓ En la modelación se identificó que los flujos se bifurcan en dos sectores, el primero inicia en el sector Santa María de los Ángeles, sigue su curso por el barrio Pekín hasta la Av. Las Palmas. El segundo sector se origina en el mismo punto, pero en el área urbana va desde la Cra 5 hasta la Cra 12.
- ✓ La modelación 2D permite determinar con detalle áreas de amenaza no identificadas en otros estudios, debido a que estos se limitan a una modelación 1D donde sobresale un flujo perpendicular al lecho de la quebrada, así como, el análisis multitemporal de imágenes. Predominan las áreas con amenaza media, alcanzando profundidades de hasta 1 metro, velocidades de máximo $16\frac{m}{s}$, y sedimentos en suspensión entre $(295\ y\ 1248)\ \frac{g}{L}$, condiciones propias de un flujo de tipo normal a hiperconcentrados.
- ✓ Iber es una herramienta flexible para el análisis de flujos en áreas urbanas, debido a que utiliza elementos finitos, permitiendo la incorporación de áreas de desbordamiento, canales abiertos y estructuras hidráulicas tipo alcantarilla (Box Culvert).
- ✓ Se considera que la modelación del Box Culvert localizado entre la carrera 4 hasta puente de las Águilas evidencio la relevancia de esta estructura en los eventos de avenidas torrenciales, dado que, a causa de su sección transversal

- ✓ reducida tiene una baja capacidad hidráulica y por lo tanto es susceptible a obstruirse por sedimentos removilizados de tamaños considerables, escombros, material vegetal, entre otros.

Recomendaciones

- ✓ Teniendo en cuenta la importancia de las estructuras hidráulicas como el Box Culvert en la modelación, se utilizó una herramienta de condición de alcantarilla en el Software con un detalle de diseño generalizado. Sin embargo, se recomienda emplear simultáneamente programas como CivilCAD que permitan incorporar estas estructuras con mayor precisión.
- ✓ Para mayor análisis, se considera que se podría incrementar el área de influencia, dado que se observó en el software que los flujos tienen la tendencia a distribuirse hacia el occidente. Para esto, se recomienda contar con recursos tecnológicos de mayor capacidad para correr el modelo, teniendo en cuenta el detalle de la malla y el tamaño de celda del Modelo de Elevación Digital (DEM).
- ✓ Se recomienda restaurar la sección transversal del Box Culvert, con el motivo de que se prevenga la obstrucción del canal y por lo tanto se disminuya el riesgo de inundación.

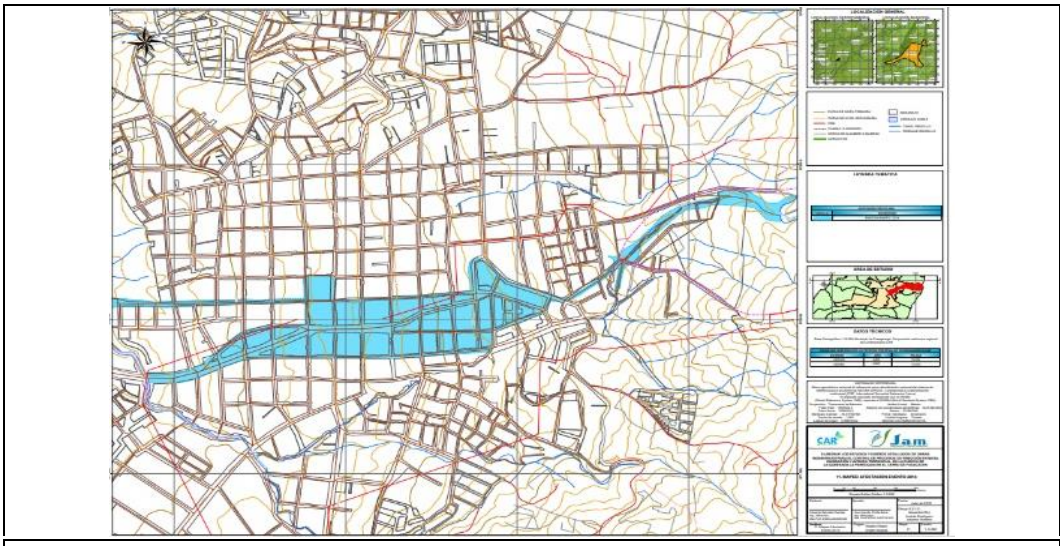


Figura 6. Mapa de afectación emergencia de 2014. Nota. Elaborado por (J.A.M Ingeniería y medio ambiente, 2016).

Figura 7. Mapa de predios Urbanos susceptibles por fenómenos de inundación a causa del desbordamiento de la Quebrada la Parroquia
Nota. Tomado de (Sarmiento & Rodriguez, 2018)

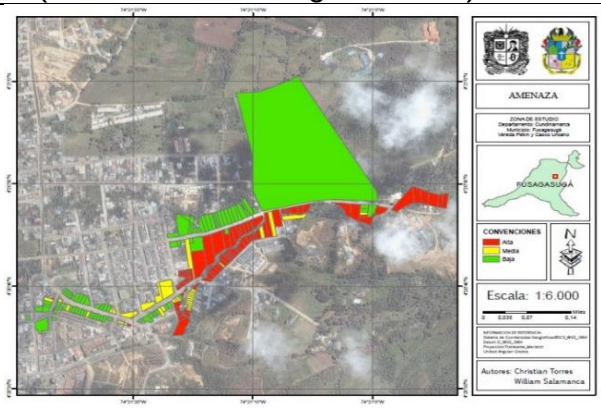


Figura 8. Amenaza por avenidas torrenciales (Herramienta Teledetección)
Nota. Imagen tomada de (Sarmiento & Pura, 2017)

Figura 9. Reconocimiento en campo del drenaje alterno. Imagen tomada en el sector conocido como Sta. María de los Ángeles junto a la Planta de potabilización -PEKIN. Elaborada por Autores, 2021

Figura 10. Mapa de velocidad 50 años. Elaborado por Autores, 2021.

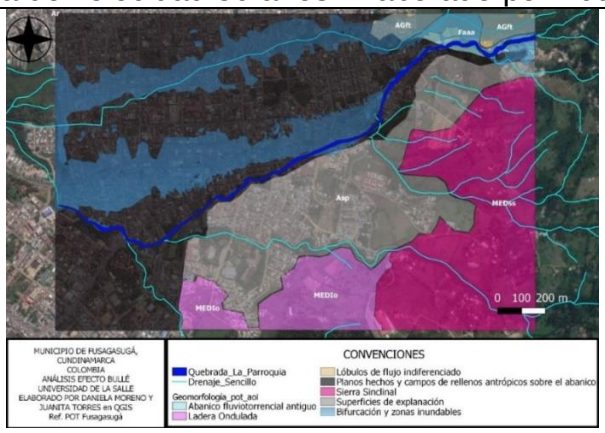


Figura 11. Análisis Efecto Bullé en Abanico fluviotorrencial. Elaborada por Autores, 2021

Figura 12. Detalle aguas flujo de detritos zona suburbana .Tomado (SGC, 2014).

Referencias bibliográficas

Edier, A., Isabel, A. C., & Ingrid, G. L. (2020). Definición y clasificación de las avenidas torrenciales y su impacto en los Andes colombianos. Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía. Bogotá.

García, M. H., MacArthu, R. C., French, R., & Miller, J. (2008). Sedimentation Engineering. En Sedimentation Hazards (págs. 885-936).

Ordoñez, J. I. (Septiembre de 2021). Conferencia de Caudales Extrahidrológicos, Avenidas Torrenciales. Bogotá, Cundinamarca, Colombia.

Sarmiento, Y. S. (2018). Análisis multitemporal del cambio en el cauce fluvial de la quebrada la parroquia en el municipio de Fusagasugá, para los años 1951, 1988, 1996 y 2010. Fusagasugá.

UNGRD. (2012). Guía metodológica para la elaboración de Planes Departamentales para la Gestión del Riesgo.

Watershed Protection District;WEST Consultants, Inc. (2011). Sediment/Debris Bulking Factors and Post-fire Hydrology For Ventura County. Ventura.

ACODAL
ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
65° CONGRESO INTERNACIONAL
Agua, Saneamiento, Ambiente y Energías Renovables
Bogotá - Colombia
Centro de Convenciones Ágora
Julio 13, 14 y 15 de 2022

Optimización de la representación del avance de humedecimiento en riego por goteo superficial a partir del número de sensores y su separación

I. Cristóbal Muñoz[1], J.V. Prado Hernández[2*], A. Ruiz García[3], D. Cristóbal Acevedo[2]

[1]Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo.
[2]Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo.
[3]Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo.
*Autor corresponsal: Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco KM 38.5, Chapingo, Texcoco, México. 56230. México. Email: vpradohdez@gmail.com

Abstract

At present, at a global level, agriculture is required to produce more food, but with less water, where drip irrigation can be an excellent option to face this challenge. Reliable and accurate information on wetting patterns is necessary to obtain the maximum benefit from drip irrigation. The use of soil moisture sensors has played an important role in the development of research on this topic. The main limitation of the use of sensors in experiments is that the number of sensors used and their separation between them is determined empirically. For this reason, the objective of this research was to optimize the representation of the vertical advance of wetting in surface drip irrigation, based on the number of soil moisture sensors and their separation. For this, the HYDRUS-1D software was calibrated with experimental data, then graphical representations of the vertical wetting advance were created with SURFER 10 in different scenarios, with the above information a mathematical model was generated as an objective function to be optimized, in which it was obtained the root mean square error (RMSE) of the plot from the number of sensors and their separation. It was possible to optimize the representation of the vertical wetting advance, obtaining with 5 sensors and 10 cm of separation an optimal value of the RMSE of 1.72 cm.

KeyWords: Irrigation optimization, nonlinear programming, soil water movement modeling, wetted bulb, wetting front.

ACODAL
ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
65° CONGRESO INTERNACIONAL
Agua, Saneamiento, Ambiente y Energías Renovables
Bogotá - Colombia
Centro de Convenciones Ágora
Julio 13, 14 y 15 de 2022

OPTIMIZACIÓN DE LA REPRESENTACIÓN DEL AVANCE DE HUMEDECIMIENTO EN RIEGO POR GOTEO SUPERFICIAL A PARTIR DEL NÚMERO DE SENSORES Y SU SEPARACIÓN

Resumen

En la actualidad a nivel mundial se le exige a la agricultura una mayor producción de alimentos, pero con una menor cantidad de agua, donde el riego por goteo puede ser una excelente opción para enfrentar este desafío. Para obtener el máximo beneficio del riego por goteo es necesaria información confiable y precisa de los patrones de humedecimiento. El uso de sensores de humedad del suelo ha jugado un papel importante en el desarrollo de las investigaciones de esta temática. La principal limitación del uso de sensores en experimentos es que el número de sensores utilizado y su separación entre ellos se determina de manera empírica. Por este motivo el objetivo de la presente investigación fue optimizar la representación del avance vertical de humedecimiento en riego por goteo superficial, a partir del número de sensores de humedad del suelo y su separación. Para ello se calibró el software HYDRUS-1D con datos experimentales, después se crearon representaciones gráficas del avance vertical de humedecimiento con SURFER 10 en distintos escenarios, con la información anterior se generó un modelo matemático como función objetivo a optimizar, en el cual se obtuvo la raíz del error cuadrático medio (RMSE) de la representación gráfica a partir del número de sensores y su separación. Se logró optimizar la representación del avance vertical de humedecimiento obteniendo con 5 sensores y 10 cm de separación un valor óptimo del RMSE de 1.72 cm.

Palabra clave: Bulbo húmedo, frente de humedecimiento, modelación del movimiento del agua en el suelo, optimización del riego, programación no lineal.

Introducción

El alto consumo de agua disponible por la agricultura, la baja eficiencia en su uso a nivel mundial, y la fuerte competencia por dicho recurso por los diferentes sectores, demandan a la agricultura una optimización de la producción de alimentos, utilizando menos agua, sin degradar el suelo y los recursos hídricos (Skaggs *et al*., 2004). La tecnología de riego por goteo puede ayudar a enfrentar este desafío, debido a su alta eficiencia de aplicación, otorgando a los productores un mayor control sobre la aplicación de agua, fertilizantes y pesticidas, además de reducir los costos por bombeo (Júnior *et al*., 2016). Para lograr el potencial que ofrece la tecnología del riego por goteo, es necesario optimizar aspectos de diseño y operación, tales como: espaciamiento de instalación de los emisores, caudales de los emisores, frecuencia y tiempo del riego (Skaggs et al., 2004).

En el diseño de sistemas de riego por goteo para cultivos en hileras, las dimensiones del volumen de mojado y la distribución de humedad dentro de este volumen, son dos de los factores principales para determinar el espaciamiento de los goteros para obtener una distribución óptima del agua en la zona radicular del cultivo (Kandelous y Šimůnek, 2010b). Por este motivo, diversos investigadores han realizado trabajos en campo y laboratorio para obtener información acerca de los patrones de humedecimiento en riego por goteo (Subbaiah, 2013).

La distribución de humedad del volumen de mojado se puede obtener por tres medios: a través de mediciones en experimentos en campo, con mediciones en modelos físico experimentales en laboratorio, y con el uso de modelos matemáticos (Cruz-Bautista *et al*., 2016). Existe una problemática al realizar los experimentos de riego en campo, debido a varios factores externos y complicaciones al tomar las mediciones, alterando los posibles resultados (Cristóbal-Muñoz *et al*., 2022), debido a esto y al avance de tecnologías de medición de humedad del suelo, diversos autores realizaron experimentos de riego por goteo en ambientes controlados, ellos obtuvieron resultados satisfactorios a partir de modelos físicos de paredes transparentes, donde se pudieron observar los patrones de humedecimiento de una fuente puntual de riego en tiempo real y sin alterar físicamente el suelo durante las mediciones (Kandelous y Šimůnek, 2010a; Nafchi *et al*., 2011; Al-Ogaidi *et al*., 2016; Iqbal *et al*., 2017).

Cada día es más común el uso de sensores de humedad del suelo en experimentos de campo o laboratorio (Al-Ghobari, 2012; Júnior *et al*., 2016), donde a partir de la información experimental o de la calibración de modelos matemáticos numéricos con datos experimentales, se pueden obtener representaciones graficas del avance de humedecimiento en distintas condiciones iniciales y de riego (Figura 1).

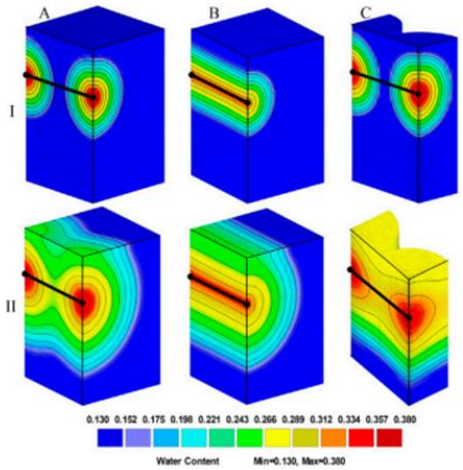


Figura 1: Representación gráfica de la distribución del contenido de humedad del suelo en riego por goteo subsuperficial (Fuente: Kandelous *et al*., 2011).

La medición de la distribución de humedad en riego por goteo con el uso de sensores de humedad del suelo es una buena alternativa, siempre que estos sean precisos y permitan medir con alta frecuencia la evolución espacio-temporal de la humedad en el suelo, pero es necesario contemplar un especial cuidado en su instalación y uso, además del costo de su adquisición (Cristóbal-Muñoz *et al*., 2021). La principal limitación del uso de sensores en experimentos de campo o laboratorio es que el número de sensores utilizado y su separación entre ellos se determina de manera empírica, restringiendo la calidad de los resultados obtenidos por un mal posicionamiento de los sensores.

Por este motivo el presente trabajo buscó utilizar las bondades de la programación lineal y no lineal, para optimizar la representación del avance de humedecimiento en riego por goteo superficial a partir del número de sensores de humedad del suelo y su separación, encontrando la posición y el número óptimo de sensores a utilizar, minimizando el error de la representación gráfica del avance vertical de humedecimiento.

Material y metodología

La metodología experimental se definió a partir de las experiencias obtenidas por Ditkowski *et al*. (2000), Deep y Das (2008) y Soulis y Elmaloglou (2018) en la optimización de la infiltración de sustancias a través de un medio poroso, y de las experiencias de Schwartzman y Zur (1986), Amin y Ekhmaj (2006), Malek y Peters (2011), Al-Ogaidi *et al*. (2015), y Cruz-Bautista *et al*. (2016) en la generación de modelos matemáticos del avance de humedecimiento a partir de regresiones con múltiples variables.

La metodología constó de tres partes principales; la primera fue la calibración del software HYDRUS-1D (Kandelous y Šimůnek, 2010a) con datos experimentales para obtener una mejor representación del avance vertical de humedecimiento (Figura 2), la segunda parte fue crear representaciones graficas del avance vertical de humedecimiento con el Software SURFER 10 (Golden Software, Inc. ®) y la información de HYDRUS-1D (Figura 3), donde se contemplaron distintos escenarios físicos (variaciones del número de sensores utilizados y separación entre sensores), la tercera parte fue generar un modelo matemático como función objetivo a optimizar, en el cual se obtenga la raíz del error cuadrático medio (RMSE) de la representación gráfica a partir del número de sensores y su separación.

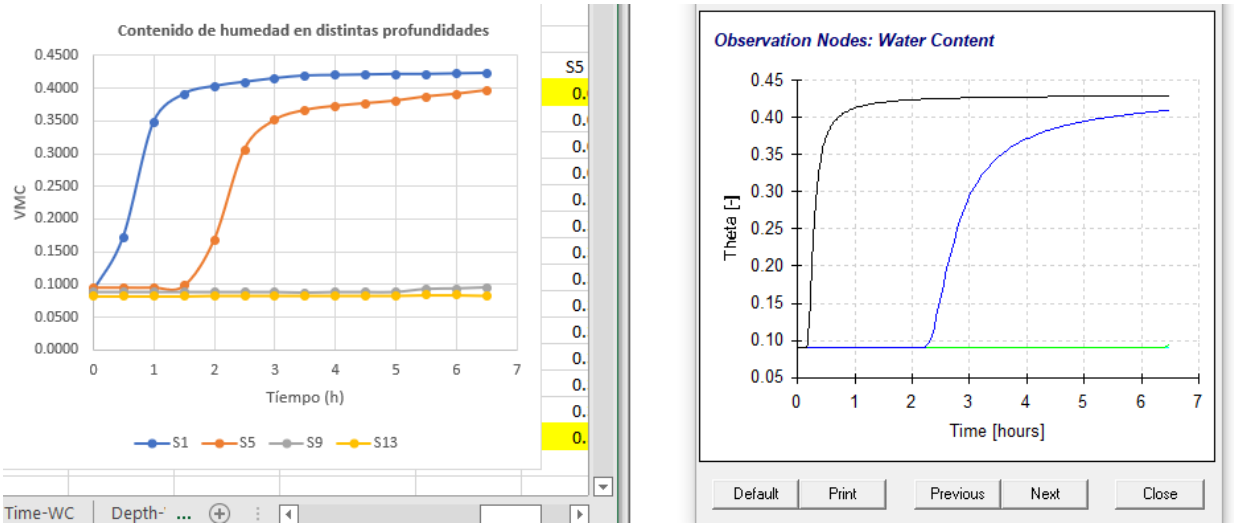


Figura 2: Calibración HYDRUS-1D.

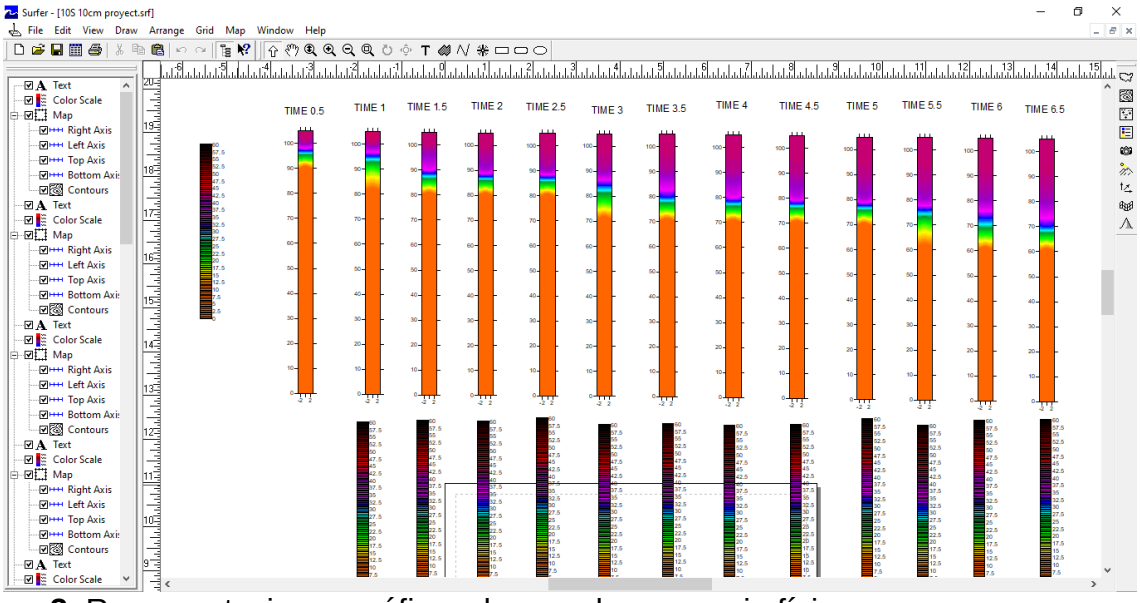


Figura 3: Representaciones gráficas de un solo escenario físico.

En la primera parte de la metodología la calibración de HYDRUS-1D fue a partir de la información de un primer riego por goteo superficial en un suelo de textura franco arenosa (52.2% de arena, 28.8% de limo y 19% de arcilla), con un caudal del emisor de 2.92 litros,

una densidad aparente de 1.4 g cm^{-3} y una duración de riego de 6.5 horas, en un modelo físico de paredes transparentes igual al utilizado por Cristóbal Muñoz *et al.* (2022). En la Figura 4 se observa el posicionamiento de los sensores de humedad del suelo dentro del modelo físico de paredes transparentes, donde solo se contempló para la calibración de HYDRUS-1D la información de los cuatro sensores que se encuentran por debajo del emisor. Los sensores de humedad del suelo que se utilizaron fueron los sensores modelo S-SMC-M005 (Onset HOBO ®) cuyo error es de 3%.

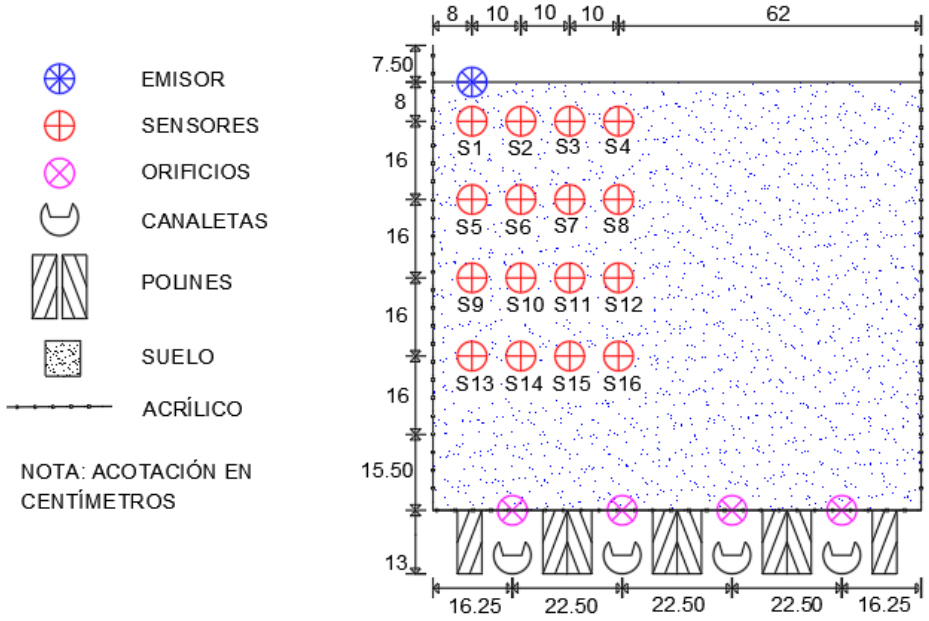


Figura 4: Posicionamiento de los sensores de humedad del suelo dentro del modelo físico de paredes transparentes.

Para el caso de la segunda parte de la metodología se definió el espacio de estudio para las representaciones gráficas del avance vertical de humedecimiento, se simuló con HYDRUS-1D calibrado el proceso de infiltración en un perfil de suelo de 105 cm de profundidad, con distintos escenarios físicos donde se variaba el arreglo de los sensores, la variable X es la distancia entre sensores y la variable Y es el número de sensores utilizados (Figura 5). El primer sensor se colocó siempre a 5 cm de profundidad de la superficie del suelo ya que es el límite mínimo permisible recomendado por el fabricante de los sensores para colocar un sensor cerca de la superficie del suelo. El límite mínimo permisible de separación entre sensores recomendado por el fabricante es de 10 cm

debido que a separaciones menores se generan mediciones erróneas por interferencia entre sensores, por este motivo X varió de 10 a 30 cm con incrementos de 5 cm y Y varió de 3 a 10 sensores con un incremento de un sensor, dando un total de 20 escenarios físicos posibles donde las restricciones fueron el espacio disponible de estudio y las limitantes físicas de los instrumentos de medición utilizados.

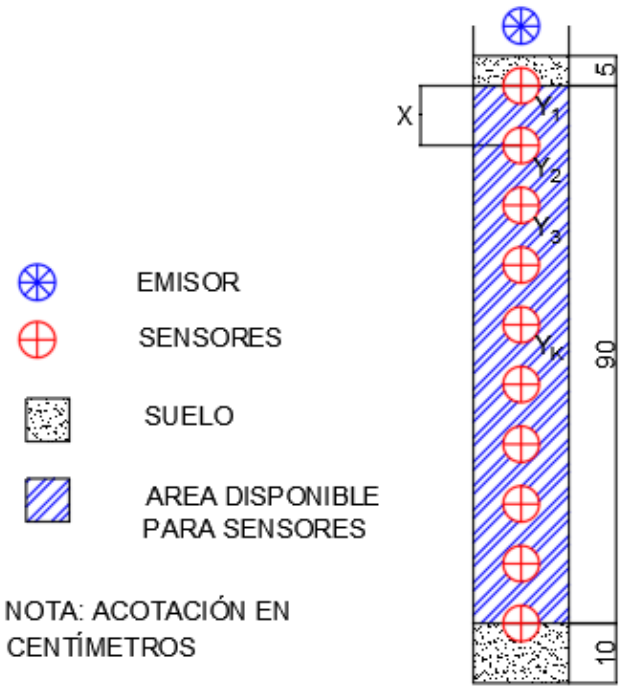


Figura 5: Espacio de estudio y posicionamiento de los sensores en las simulaciones de riego.

Después se utilizó SURFER-10 para generar las representaciones gráficas del avance de humedecimiento en cada escenario físico simulado en HYDRUS-1D, utilizando el método de Kriging para realizar interpolaciones entre las mediciones de los sensores simulados, las representaciones gráficas fueron generadas tomando la información simulada en intervalos de 30 minutos de las 6.5 horas del riego, dando un total de 13 representaciones gráficas por escenario físico como se observa en la Figura 3. A partir de las mediciones observadas del avance vertical de humedecimiento en la prueba experimental y las mediciones de avance estimadas por las representaciones gráficas se calculó el RMSE para cada escenario físico (Ecuación 1).

$$RMSE = \left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(P_i - O_i)^2\right]^{1/2} \qquad \textbf{Ecuación (1)}$$

Donde
N: Número total de datos.
Pi: I-ésimo dato estimado.
Oi: I-ésimo dato observado.

En la tercera parte de la metodología se definió la función objetivo a optimizar en el cual se generó un modelo matemático para la determinación del RMSE de la representación gráfica a partir de la separación entre sensores (X) y el número de sensores utilizados (Y). Se probaron distintos modelos matemáticos a partir de regresiones múltiples lineales y no lineales, además de modelos generados por la aplicación CFTOOL (Curve Fitting) del software MATLAB (The MathWorks, Inc. ®). Obteniendo el siguiente problema de optimización.

$$Z\min = funcion\ objetivo\ (X, Y) \qquad \textbf{Ecuación (2)}$$

Sujeto a las siguientes restricciones debidas al espacio disponible de estudio y las limitantes físicas de los instrumentos de medición utilizados.:

$$X(Y-1) \leq 90 \qquad \textbf{Ecuación (3)}$$

$$10 \leq X \leq 30 \qquad \textbf{Ecuación (4)}$$

$$3 \leq Y \leq 10 \qquad \textbf{Ecuación (5)}$$

$$Y = Número\ entero\ positivo \qquad \textbf{Ecuación (6)}$$

Donde
Y: Número de sensores.
X: Distancia entre sensores

Resultados y discusión

En la Ecuación 7 se puede observar el modelo matemático que obtuvo los mejores resultados (CFTOOL-MATLAB) y en la Figura 6 el comportamiento de dicho modelo.

$$RMSE = 238.2 - 26.03X - 111.4Y + 0.9181X\text{^}2 + 10.12XY + 17.83Y\text{^}2 - 0.01037X\text{^}3 - 0.2777X\text{^}2\,Y - 1.152XY\text{^}2 - 1.175Y\text{^}3 + 0.002342X\text{^}3\,Y + 0.01668X\text{^}2\,Y\text{^}2 + 0.041XY\text{^}3 + 0.02673Y\text{^}4 \qquad \textbf{Ecuación (7)}$$

Donde

Y: Número de sensores.

X: Distancia entre sensores.

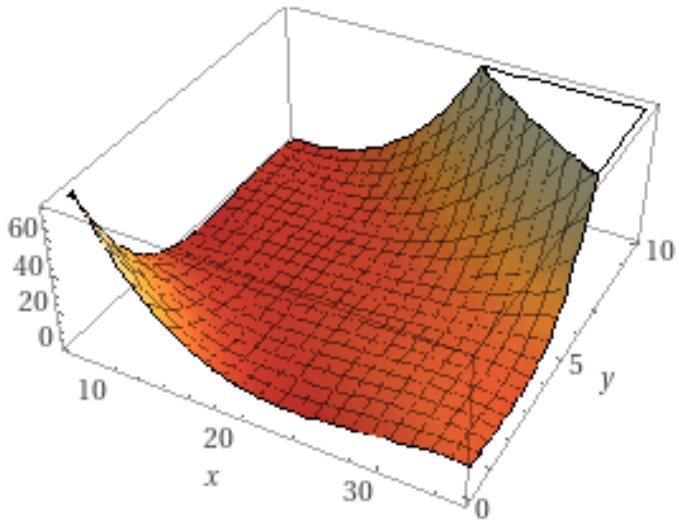


Figura 6: Comportamiento del mejor modelo matemático obtenido.

A partir de la Ecuación 7 se obtuvo un problema de optimización no lineal, el cual se resolvió con las funciones “fmincon” y “SQP” del Software MATLAB, dando como resultados óptimos 10 cm de separación entre sensores (X_{opt}) y 5 sensores utilizados (Y_{opt}), siendo 10 cm el límite mínimo permisible recomendado por el fabricante de los sensores de humedad del suelo, ya que con separaciones menores existe interferencia entre las mediciones de sensores generando mediciones erróneas. Además, con una configuración de 5 sensores a 10 cm de separación se llega a una profundidad de observación de 55 cm cuando las simulaciones del avance vertical de humedecimiento

solo llegaron a 35 cm, esto quiere decir que el número óptimo de sensores a utilizar es entre 1 a 2 sensores más por fuera del avance máximo que se requiera estudiar.
El valor del RMSE de las representaciones gráficas con la configuración optima (X = 10 cm, Y = 5 sensores) es de 1.72 cm, siendo un excelente resultado en comparación a lo encontrado por Cristóbal-Muñoz *et al*. (2020) en la predicción de la geometría del bulbo de mojado en una textura franco arcillo arenosa, a partir de mediciones de sensores de humedad del suelo y el método de Kriging con el software SURFER 10, con 4 sensores y una separación de 20 cm entre ellos, donde los valores de RMSE oscilaron entre 3.4 a 8.7 cm en la predicción de la profundidad de mojado.

Conclusiones

Se logró optimizar la representación del avance vertical de humedecimiento en riego por goteo superficial a partir del número de sensores de humedad del suelo y su separación. Comprobando que la mejor distancia entre sensores es la mínima permitida por las limitantes físicas de los aparatos utilizados, además el número óptimo de sensores es entre 1 a 2 sensores más por fuera del avance máximo que se requiera estudiar.

Agradecimientos. Se agradece a la Dirección General de Investigación y Posgrado de la Universidad Autónoma Chapingo por el apoyo otorgado para la adquisición del sistema experimental y para la asistencia al congreso. El primer autor agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca recibida.

Referencias bibliográficas

Amin, M. S. M., and Ekhmaj, A. I. M. (2006). DIPAC-Drip Irrigation Water Distribution Pattern Calculator. 7th International Micro Irrigation Congress, 10-16 Sept., Pwtc, Kuala Lumpur, Malaysia.

Al-Ghobari, H. M. (2012). A comparison of water application uniformity for drip irrigation system above and below soil surface at various soil depths and scheduling techniques in arid region. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, *168*, 311-322.

Al-Ogaidi, A. A. M., Wayayok, A., Rowshon, M., & Abdullah, A. (2015). A Modified Empirical Model for Estimating the Wetted Zone Dimensions under Drip Irrigation. *J. Teknol*, 76, 69–73. DOI: 10.11113/jt.v76.5954

Al-Ogaidi, A. A. M., Wayayok, A., Rowshon, M., and Abdullah, A. (2016). Wetting patterns estimation under drip irrigation systems using an enhanced empirical model. *Agricultural Water Management*, 176, 203-213. DOI: 10.1016/j.agwat.2016.06.002

Cristóbal-Muñoz, I., Prado-Hernández, J. V., and Cristóbal-Acevedo, D. (2020). *Geometría del bulbo de mojado de riego por goteo a partir de sensores de humedad de suelo*. Memoria del VIII Congreso Internacional y XXII Congreso Nacional de Ciencias Agronómicas. Chapingo, México. 417-418.

Cristóbal-Muñoz, I., Prado-Hernández, J. V., Salazar-Moreno, R. y Martínez-Ruiz, A. (2021*). Aplicación de redes neuronales artificiales en la medición de las dimensiones del bulbo húmedo en riego por goteo superficial*. Décimo congreso Internacional de Investigación en Ciencias Básicas y Agronómicas, Universidad Autónoma Chapingo, 21 y 22 de octubre de 2021. 50 pp.

Cristóbal-Muñoz, I., Prado-Hernández, J. V., Martínez-Ruiz, A., Pascual-Ramírez, F., Cristóbal-Acevedo, D., and Cristóbal-Muñoz, D. (2022). An Improved Empirical Model for Estimating the Geometry of the Soil Wetting Front with Surface Drip Irrigation. *Water*, **14**(11), 1827.

Cruz-Bautista, F., Zermeño-González, A., Álvarez-Reyna, V., Cano-Ríos, P., Rivera-González, M., y Siller-González, M. (2016). Validación de un modelo para estimar la extensión del bulbo de humedecimiento del suelo con riego por goteo. *Tecnología y ciencias del agua*, **7**(1), 45-55.

Deep, K., and Das, K. (2008). Optimization of infiltration parameters in hydrology. *World Journal of Modelling and Simulation*, **4**(2), 120-130.

Ditkowski, A., Gottlieb, D., and Sheldon, B. (2000). Optimization of chemical vapor infiltration with simultaneous powder formation. *Journal of Materials Research*, **15**(12), 2695-2705. doi:10.1557/JMR.2000.0388

Iqbal, M., Ghumman, A. R., and Hashmi, N. H. (2017). Study of wetting pattern under drip–emitter using sand box model and empirical equations. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, **54**(3), 699-709. DOI: 10.21162/PAKJAS/17.6086

Júnior, J. A., Bandaranayake, W. M., and Syvertsen, J. (2016). Drip irrigation wetting patterns in a mid Florida sandy soil. *IRRIGA*, **1**(01), 1-1. DOI: 10.15809/irriga.2016v1n01p1-25

Kandelous, M. M., and Šimůnek, J. (2010a). Comparison of numerical, analytical, and empirical models to estimate wetting patterns for surface and subsurface drip irrigation. *Irrigation Science*, 28, 435-444. DOI: 10.1007/s00271-009-0205-9

Kandelous, M. M., and Šimůnek, J. (2010b). Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using HYDRUS-2D. *Agricultural Water Management*, **97**(7), 1070-1076. DOI: 10.1016/j.agwat.2010.02.012

Kandelous, M.M., Simunek, J., Van Genuchten, M., and Malek, K. (2011). Soil Water Content Distributions between Two Emitters of a Subsurface Drip Irrigation System. *Soil Science Society of America Journal*. 75. 488-497. DOI: 10.2136/sssaj2010.0181.

Malek, K., and Peters, R. T. (2011). Wetting Pattern Models for Drip Irrigation: New Empirical Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **137**(8), 530-536. DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000320

Nafchi, R. F., Mosavi, F., and Parvanak, K. (2011). Experimental Study of Shape and Volume of Wetted Soil in Trickle Irrigation Method. *African Journal of Agricultural Research*, **6**(2), 458-466. DOI: 10.5897/AJAR10.727

Schwartzman, M., and Zur, B. (1986). Emitter spacing and geometry of wetted soil volume. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **112**(3), 242–253. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(1986)112:3(242)

Skaggs, T. H., Trout, T. J., Simunek, J., and Shouse, P. J. (2004). Comparison of HYDRUS-2D simulation of drip irrigation with experimental observations. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **130**(4), 304-310. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2004)130:4(304)

Soulis, K., and Elmaloglou, S. (2018). Optimum soil water content sensors placement for surface drip irrigation scheduling in layered soils. *Computers and Electronics in Agriculture*, 152, 1-8. DOI: 10.1016/j.compag.2018.06.052.

Subbaiah, R. (2013). A review of models for predicting soil water dynamics during trickle irrigation. *Irrigation Science*, 31, 225–258. DOI: 10.1007/s00271-011-0309-x

ACODAL
ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
65° CONGRESO INTERNACIONAL
Agua, Saneamiento, Ambiente y Energías Renovables
Bogotá - Colombia
Centro de Convenciones Ágora
Julio 13, 14 y 15 de 2022

Evaluación de los servicios ecosistémicos que ofrecen los agroecosistemas aledaños a la microcuenca La Hidráulica como fuente abastecedora del acueducto de Sibundoy Putumayo

Adriana del Socorro Guerra Acosta [1*], Dayana Ivone Villota Yama[2], Maritza Yuliet Burbano Muñoz [3], Jenny Marcela Tisoy Gaviria[4]

[1] Instituto Tecnológico del Putumayo, Sede Sibundoy Ampliación Colón.
[2, 3, 4] Instituto Tecnológico del Putumayo, Sibundoy Putumayo, Colombia. Tecnólogas en Saneamiento Ambiental.

**Autor corresponsal:* Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Instituto Tecnológico del Putumayo, municipio de Colón Putumayo, Calle 3 Kra 8- 9, Barrio El Centro País. Colombia. Email: aguerra@itp.edu.co– 3137272771.

Resumen

La investigación evaluó los servicios ecosistémicos que ofrecen 10 fincas aledañas a la microcuenca La Hidráulica, a través de la matriz de doble entrada propuesta por Castañeda, 2013, obteniendo como resultados que la finca La Maravilla es la que mayor nivel de significancia obtuvo por las practicas adecuadas que realiza lo cual contribuye a la protección y conservación de los recursos naturales, de igual manera implementa la agricultura orgánica que contribuye la restauración ecológica, incluye en el sistema áreas de bosques, barreras vivas en comparación con las que manejan sistemas convencionales las que minimizan los beneficios obtenidos de los servicios ecosistémicos por las actividades inapropiadas para el desarrollo de los diferentes procesos productivos, ya que se hace uso de agrotóxicos, además por el manejo de ganadería intensiva, provocando impactos negativos como compactación en el suelo, alteración en las propiedades fisicoquímicas, contaminación, generando así un desequilibrio ambiental. En las comparaciones que se realizaron en la evaluación de servicios ecosistémicos se encontró que el sistema convencional adoptado por parte de los propietarios en algunas fincas ha llevado al deterioro y a la minimización de recursos naturales, además los bienes y servicios que proveen estos en relación al bienestar humano son limitados, de tal forma en el medio ambiente se va generando un desequilibro por la contaminación de fuentes hídricas, suelo, aire, flora y fauna, y por la intervención que el hombre ha hecho a los ecosistemas con el propósito de la expansión ganadera y agrícola, que genera destrucción de los bosques de la zona de estudio.

Palabras clave: Matriz de evaluación, servicios de aprovisionamiento, regulación y soporte, socio-culturales.

Abstract

The research evaluated the ecosystem services offered by 10 farms adjacent to the La Hidráulica microbasin, through the dual entry matrix proposed by Castañeda, 2013, obtaining as results that the country house La Maravilla is the one that obtained the highest level of significance by the appropriate practices that it performs which contributes to the protection and conservation of the natural resources. Otherwise, it implements organic agriculture that contributes to ecological restoration, in comparison with the Sir. Antonio España´s farm in which it is implemented a conventional system that minimizes the benefits obtained from the ecosystem services by the inappropriate activities for the development of the different productive processes since agro-toxics are used, also because of the location of livestock species which are causing negative impacts such as soil compaction, physicochemical properties alteration, pollution. Thus, it is generating an environmental imbalance.In the comparisons made in the evaluation of ecosystem services, it was found that the conventional system adopted by landowners on some farms has led to the deterioration and minimization of natural resources. And for the intervention that man has made to the ecosystems for the purpose of cattle and agricultural expansion, which generates destruction of the forests of the study area.

Key words: Assessment matrix, supply, regulation and support services, socio-cultural.

Introducción

El concepto de "servicios ecosistémicos o ambientales" es relativamente nuevo y su aplicación y desarrollo mantiene abierto hoy un gran debate respecto de la manera en que pueden afectar positiva o negativamente los ecosistemas y las comunidades (Secretaria de Medio Ambiente y recursos naturales, 2004).

Dentro del marco conceptual introducido por el programa Millennium Ecosystem Assessment (Evaluación de los ecosistemas del milenio 2003; 2005), los servicios del ecosistema pueden ser agrupados en cuatros categorías: de provisión, de regulación, culturales y de soporte. Los servicios de provisión -alimentos, fibras, agua y materias prima- son aquellos que generalmente resultan tangibles a los sentidos del hombre y poseen un valor de mercado. Los servicios de regulación control de erosión, ciclado de nutrientes, purificación de agua, control de disturbios, regulación del clima y de las aguas- tienen, en cambio, un valor funcional que es invisible al ojo humano y no cotiza por tanto en el mercado. Su deterioro o escasez se manifiesta en problemas que en general se perciben tardíamente. Los servicios culturales -tales como patrimonio histórico, costumbres, lenguas, comidas, relaciones sociales- comienzan a ser valorados crecientemente en las sociedades organizadas, y valorizados en términos económico-comerciales a través de actividades como el agroturismo, el ecoturismo, los servicios de

recreación. Por último, los servicios de soporte -provisión de agua dulce, mantenimiento del hábitat, conservación de la biodiversidad, formación de suelos, que tampoco cotizan en los mercados actuales, son también intangibles pero esenciales para sostener a los restantes servicios naturales.

Por lo anteriormente planteado fue necesario evaluar los servicios ecosistemas que ofrecen los agroecosistemas aledaños a la microcuenca La Hidráulica, como fuente abastecedora del acueducto del municipio de Sibundoy Putumayo, caracterizada por presentar problemas de deforestación por la expansión de la frontera agropecuaria, además de degradación del recurso suelo, uso inadecuado de agrotóxicos en el manejo de los sistemas de producción que afecta el recurso agua, suelo y aire, entre otros, debido a esta problemática ambiental fue necesario evaluar a través de la matriz de doble entrada de Castañeda (2013), la que permitió conocer los bienes que se obtienen de los agroecosistemas, además se realizó análisis fisicoquímico del suelo y agua, la investigación permitirá tomar como base la metodología y los procedimientos de campo para evaluar ecosistemas de otras regiones y de esta forma establecer estrategias de manejo sostenible de los recursos naturales con que se cuenta.

Materiales y métodos.

Recolección de la información. Para llevar a cabo la revisión, recopilación y análisis de la información necesaria se realizó un acercamiento y reconocimiento de la zona de estudio mediante un recorrido dentro de las 10 fincas evaluadas, posterior a esto se aplicó una encuesta a los propietarios de las fincas que se ubican en la zona media de la microcuenca La Hidráulica que corresponde al 100% del área de estudio, con el fin de obtener datos actuales del manejo de los sistemas. Posterior al análisis de la información, se realizó un diagnóstico a través de la observación directa, con recorridos de campo en todos los sistemas evaluados con el fin de identificar el estado actual de los predios con el objetivo de evaluar los servicios ecosistémicos que ofrecen.

Trabajo de campo. Al adquirir la información se procede a observar, identificar y evaluar a través de la matriz de doble entrada propuesta por Castañeda (2013), los beneficios directos e indirectos que ofrecen los servicios ecosistémicos, en los cuales se incluye los de sustento básico, regulación y soporte y socioculturales.

Metodología para evaluar el estado de los servicios ecosistémicos.

El marco conceptual que articula los diferentes aspectos sobre los cuales se desarrolla el método de evaluación, se orienta bajo los preceptos del enfoque ecosistémico planteado en la Política Nacional para la Gestión Integral de la Biodiversidad y sus Servicios Ecosistémicos (PNGIBSE, 2012). Este tiene como base las directrices establecidas por la (Secretaría del Convenio sobre la Diversidad Biológica, 2004)

Inicialmente, la matriz de evaluación obtenida contiene los servicios ecosistémicos categorizados de manera funcional conforme a los establecidos en la Evaluación de los

Ecosistemas del Milenio (MEA, 2005), concepto que ha sido adoptado en Colombia mediante la Política Nacional para la Gestión Integral de la Biodiversidad y sus Servicios Ecosistémicos (PNGIBSE, 2012). Así, bajo estos preceptos se han identificado cuatro tipos de servicios ambientales ofrecidos por los ecosistemas.

Después de examinar las funciones que desempeñan los ecosistemas y como parte de la herramienta de evaluación, se debe establecer una correlación con los elementos que directa o indirectamente brindan bienestar al ser humano; lo cual permite conocer y analizar la interdependencia entre el sistema ecológico y social a distintas escalas, y favorece el balance de intereses de la sociedad frente a la biodiversidad y el mantenimiento de los servicios ecosistémicos derivados de esta (PNGIBSE, 2012); todo bajo los lineamientos del enfoque eco sistémico mediante el cual se busca la gestión integrada de los recursos naturales promoviendo la conservación y utilización sostenible de modo equitativo (Secretaría del Convenio sobre la Diversidad Biológica, 2004), Tabla 1.

Tabla 1. Elementos derivados de las funciones ambientales que maximizan el bienestar humano y permiten el desarrollo socio-económico y cultural de la sociedad.

FUNCIONES AMBIENTALES DE LOS ECOSISTEMAS	BIENESTAR HUMANO
Ecosistemas para sustento básico	Alimentación
	Abastecimiento de agua
	Fuente de energía
	Materias primas para construcción de vivienda
Ecosistemas para productividad	Bienestar económico
	Actividades productivas agrícolas y/o industriales
	Materias primas
Ecosistemas proveedores de recursos naturales	Ganadería
	Pesca
	Madera
	Extractos naturales de uso medicinal
	Recursos genéticos
Ecosistemas para prevención de riesgos	Control de inundaciones
	Control de deslizamientos
Ecosistemas receptores de desechos	Calidad del agua
	Calidad del aire
	Procesamiento de desechos y materia orgánica
Ecosistemas para el equilibrio ecológico	Control biológico
	Mantenimiento de la biodiversidad
	Regulación de la erosión
	Disponibilidad de nutrientes
	Mantenimiento de las condiciones climáticas
Ecosistemas que abarcan beneficios recreativos y estéticos	Belleza escénica
	Recreación y ecoturismo
Ecosistemas asociados a la identidad, legado cultural y sentido de pertenecía de una región	Importancia espiritual
	Importancia e identidad cultural

Fuente: Castañeda, 2013.

Una vez se estructuran las relaciones del sistema socio-ecológico en la matriz; se realiza una selección de las unidades de cobertura que espacial y temporalmente son reconocidas por una población específica, de acuerdo con la función que cumplen y los beneficios que brindan; y que dada esta condición deben ser evaluadas durante un proceso de consulta comunitaria.

Para ello, se tomó como base la Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra – Metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia, documento generado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2010) mediante el cual se consolida una propuesta metodológica que unifica los criterios, conceptos y métodos sobre las coberturas naturales y antropizadas presentes en el territorio colombiano (IDEAM, 2010).

La tipificación de los ecosistemas se efectúa de acuerdo con el origen de las coberturas, sean naturales o antrópicas; y el medio en el que se desarrollan terrestre o acuático, a partir de lo cual se definen y detallan las categorías expuestas en la Tabla 2.

Tabla 2. Tipificación de los Ecosistemas y Unidades de Cobertura seleccionadas para la Metodología de Evaluación.

ECOSISTEMAS	UNIDADES DE COBERTURA VEGETAL	SIMBOLO
TIPO I – ECOSISTEMAS TRANSFORMADOS	I.a Cultivos transitorios	CT
	I.b Cultivos permanentes	CP
	I.c Pastos	P
	I.d Plantaciones forestales	PF
TIPO II – ECOSISTEMAS NATURALES TERRESTRES	II.a Bosques	B
	II.b Vegetación herbácea y/o arbustiva	VH/VA
	II.c Áreas abiertas con o sin poca vegetación	AA/PV
TIPO III – ECOSISTEMAS NATURALES ACUATICOS CONTINENTALES, COSTEROS Y MARINOS	III.a Áreas húmedas continentales	AHCon
	III.b Áreas húmedas costeras	AHCos
	III.c Aguas continentales	AC
	III.d Aguas marinas	AM

Fuente: Castañeda, 2013.

Luego de construir el escenario donde fueron identificados, analizados, documentados y organizados los tipos de ecosistemas, los aspectos relativos al bienestar humano, las funciones que presentan y los servicios que proveen lo ecosistemas; se implementa el método evaluativo bajo algunos de los lineamientos conceptuales y procedimentales empleados en el Manual de Evaluación de Impacto Ambiental de Proyectos, Obras o Actividades adaptando parte de los criterios de evaluación en términos de cobertura,

permanencia y periodicidad; otros como la dimensión, oferta y nivel de satisfacción. (Arboleda G, 2008)

Tabla 3. Descripción de los criterios de evaluación, conforme al orden en el que se ubican en la matriz.

CRITERIO	DESCRIPCIÓN
DIMENSIÓN	Medio en el que sobresale la potencialidad de un ecosistema dependiendo del bienestar humano que brinda, se atañe el hecho de que son vitales para mantener el beneficio. Se encuentran: **Económica:** Son representativos cuando los beneficios obtenidos son producto de procesos productivos, industriales y agropecuarios que generan ganancias para una población. **Social:** Relevantes cuando hacen parte de la identidad, creencias o recreación de una comunidad. **Ambiental:** Importantes, cuando se reconocen las funciones en cuanto al mantenimiento de la vida, la biodiversidad y la protección y conservación de los ecosistemas estratégicos y los recursos que de allí se obtienen.
COBERTURA	Se refiere al área hasta donde se puede extender el beneficio humano obtenido por el servicio que suministra un ecosistema específico. La calificación puede ser: **Puntual:** Cuando el beneficio se halla muy localizado, y no va más allá del área donde se produce. **Local:** Cuando el extiende más allá de donde se genera, en ese caso se introduce a nivel de localidad, vereda, casco urbano y/o municipio. **Regional**: Cuando el beneficio obtenido se traslada a otras poblaciones o municipios adyacente.
OFERTA	Cantidad de elementos benéficos para el hombre provenientes de un ecosistema, y que son empleados conforme a la función que cumple y el servicio que provee. La calificación esta dad a partir de tres niveles: **Baja:** Cuando los elementos benéficos tienden a ser homogéneos, reduciendo el nivel de oferta. **Media:** Cuando se encuentran diferencias entre uno y otro elemento, y el nivel de oferta se regula. **Alta:** Cuando existe heterogeneidad entre los elementos, lo que amplía la oferta del ecosistema.

PERMANENCIA	Corresponde al tiempo en el que permanecerá el efecto del beneficio obtenido por un eco-servicio. La calificación se establece de la siguiente manera: **Corto plazo:** Cuando el beneficio transcurre en un tiempo inferior a 1 año. **Mediano plazo:** Cuando el beneficio se presenta en un periodo de tiempo de 1 a 5 años. **Largo plazo:** Cuando el beneficio permanece por más de 10 años.
PERIODICIDAD	Es la regularidad con la que se manifiesta el beneficio percibido por el servicio que proporciona un ecosistema. La calificación propuesta es: **Periódico:** Cuando la manifestación del beneficio es de forma recurrente o cíclica. **Discontinuo:** Cuando el beneficio se presenta de manera irregular o impredecible. **Continuo:** Cuando el beneficio se manifiesta constante en el tiempo.
NIVEL DE SATISFACCIÓN	El nivel de satisfacción, es el grado en que se suple una necesidad humana a través del bienestar proporcionado por un eco-servicio. Se presenta así: **Nulo:** Cuando no se cubre ninguna de las necesidades requeridas por un grado social o individuo. **Parcial:** Cuando las necesidades humanas no son cubiertas en su totalidad, pero se trabaja en las más prioritarias. **Total:** Cuando se cubre la totalidad de las necesidades manifestadas, por una comunidad o individuo.

Fuente: Castañeda, 2013

Las escalas de calificación para los criterios de cobertura, oferta, permanencia, periodicidad y nivel de satisfacción se trabajan en intervalos cada 5, siendo 1 el valor más bajo y 10 el más significativo. Cabe aclarar que en este caso el criterio de “dimensión” no es calificable de manera cuantitativa, sino simbólica, pues la idea es resaltar el medio en el que sobresale el bienestar obtenido de un determinado ecosistema, a nivel ambiental, social o económico. De esta manera, los valores asignados a cada criterio corresponden a los expuestos en la Tabla 4 (Arboleda G, 2008).

Tabla 4. Criterios y valores de calificación empleados en la evaluación.

CRITERIO	SIMBOLO	CALIFICACIÓN	ID
DIMENSIÓN	Di	Económico	
		Sociocultural	
		Ambiental	
CRITERIO	SIMBOLO	CALIFICACIÓN	VALOR
COBERTURA	Co	Puntual	1
		Local	5
		Regional	10
OFERTA	Of	Baja	1
		Media	5
		Alta	10
PERMANENCIA	Pem	Corto plazo(<1 año)	1
		Mediano plazo(1-5 años)	5
		Largo plazo(>10 años)	10
PERIODICIDAD	Per	Periódico	1
		Discontinuo	5
		Continuo	10
NIVEL DE SATISFACCION	NS	Nula	1
		Parcial	5
		Total	10

Fuente: Castañeda, 2013.

Al implementar la herramienta, la interpretación de los resultados permitirá conocer el nivel de importancia que un determinado ecosistema alcanza para una comunidad específica de acuerdo con la satisfacción de sus necesidades y el bienestar brindado. Por consiguiente, el nivel de importancia resulta de sumar los indicadores de cobertura, oferta, permanencia, periodicidad y nivel satisfacción; el valor numérico que arroja la ecuación se convierte luego en una expresión que indica el grado de significancia de un eco-servicio; cuyo valor estará considerado en un rango de 1 a 50, tal y como se detalla en la Tabla 5. (Arboleda G, 2008)

$$I = Co + Of + Pem + Per + NS$$

Dónde:
I = Nivel de Importancia
Co = Cobertura
Of = Oferta
Pem = Permanencia
Per = Periodicidad
NS = Nivel de Satisfacción

Tabla 5. Nivel de Significancia de los Ecosistemas conforme al Bienestar Humano y Servicios Ambientales que proveen.

IMPORTANCIA	VALOR
Irrelevante	1-14,99
Moderada	15-29,99
Importante	30-49,99
Muy importante	>50

Fuente: Castañeda, 2013.

Finalmente, los aspectos y parámetros mencionados anteriormente se disponen y ordenan en la matriz de evaluación elaborada en Microsoft Excel. Se consolida toda la información trabajada en esta mediante columnas y filas en las que se hallan desde los tipos de servicios ecosistémicos que agrupan las funciones ambientales e inciden en el bienestar humano; hasta cruzarse con aquellas que reúnen los tipos de ecosistemas conforme a su origen y medio en el que se desarrollan.

Evaluación de servicios ecosistémicos. Se adoptó la matriz de doble entrada propuesta por Castañeda, la cual se elaboró en el programa Microsoft Excel (Figura 2), en donde se identificó los diferentes tipos de servicios que proveen los ecosistemas con relación al bienestar humano, con estos parámetros se obtuvo el nivel de importancia de cada zona de estudio (Fincas).

FINCA Nº 4 ANTONIO ESPAÑA																																		
TIPO DE SERVICIOS ECOSISTEMICOS	FUNCIONES AMBIENTALES DE LOS ECOSISTEMAS	ECOSISTEMAS	TIPO I. ECOSISTEMAS TRANSFORMADOS.																								TIPO IV. ECOSISTEMAS NATURALES ACUATICOS							
			I.a Cultivos transitorios								I.b Cultivos permanentes								I.c Pastos								IV.a Aguas continentales							
		BIENESTAR HUMANO	Va	Co	Of	Pem	Per	NS	I	Nsi	Va	Co	Of	Pem	Per	NS	I	Nsi	Va	Co	Of	Pem	Per	NS	I	Nsi	Va	Co	Of	Pem	Per	NS	I	Nsi
SERVICIOS ECOSISTEMICOS DE ABASTECIMIENTO O APROVISIONAMIENTO	Ecosistemas que satisfacen necesidades (sustento basico)	Alimentacion	S	1	1	5	5	5	17	M	E	10	1	5	5	5	26	M																
		Abastecimiento de agua																									A	5	10	10	10	10	45	IM
		Fuentes de energia																																
		Materias primas para construccion de viviendas																																
	Ecosistemas para productividad	Bienestar economico	E	5	5	5	5	5	25	M	E	10	1	5	5	5	26	M																
		Actividades productivas agricolas y/o industriales																																
		Materias primas																	E	5	1	10	10	5	31	IM								
	Ecosistemas proveedores de recursos naturales	Ganaderia																																
		Pesca																																
		Madera																																
		Extractos naturales de uso medicinal																																
		Recursos geneticos																																
SERVICIOS ECOSISTEMICOS DE REGULACION Y SOPORTE	Ecosistemas para prevencion de riesgos (mecanismo de respuesta a eventos naturales	Control de inundaciones																																
		Control de deslizamientos																																
	Ecosistemas receptores de desechos (reducir la concentracion de contaminantes en el entorno)	Calidad de agua																																
		Calidad de aire	A	1	1	5	5	5	17	M	A	1	1	5	5	5	17	M																
		Procesamiento de desechos y materia organica	A	1	5	1	1	5	13	IR	A	1	5	1	1	5	13	IR																
	Ecosistemas para el equilibrio ecologico	Control biologico																																
		Mantenimiento de la biodiversidad																																
		Regulacion de la erosion																																
		Disponibilidad de nutrientes	A	1	1	5	5	5	17	M	A	1	1	5	5	5	17	M																
		Mantenimiento de las condiciones climaticas																																
SERVICIOS ECOSISTEMICOS SOCIO-CULTURALES	Ecosistemas que abarcan beneficios recreativos y esteticos	Belleza escenica																																
		Recreacion y ecoturismo																																
	Ecositemas asociados a la identidad, legado cultural y sentido de pertenencia de una region	Importancia espiritual	S	1	1	5	5	5	17	M	S	1	1	5	5	5	17	M																
		Importanica e identidad cultural																																

Figura 2. Matriz de doble entrada para la evaluación de los servicios ecosistémicos. Fuente: Castañeda (2013)

La información se analizó mediante matrices para cada uno de los agrosistemas evaluado, se incluyó inicialmente el que ofrece mayores servicios ecosistémicos que fue el número 1 y el de menores que fue el 4, con ellos se explicara los resultados en la matriz de evaluación.

Resultado y discusión.

A continuación, se presenta los resultados obtenidos de las diferentes visitas a los diez sistemas evaluados, Tabla 6.

Tabla 6. Sistemas evaluados en la investigación.

No del sistema	Propietario	Agrosistema (Finca)
1	Manuel Florentino Ordoñez	
2	Horacio Narváez	
3	María Narváez	

4	Antonio España	
5	Edilma Estrada	
6	Jorge España	
7	Fabián Burgos	

8	Carlos Betancur	
9	Teresa Jacanamejoy	
10	Oscar Villota	

Fuente: Esta investigación.

Agrosistema N° 1. Posee un área total de 2 hectáreas siendo estás distribuidas de la siguiente manera: una hectárea especialmente para conservación, y otra para el sistema agrosilvopastoril; mediante el recorrido se pudo observar que en el primer sistema se han introducido especies arbóreas como eucalipto rojo (*Eucalyptus camaldulensis)*, ciprés (*Cupressus*), pino pátula (*Pinus patula)*, acacia negra *(Gleditsia triacanthos)* y aliso *(Aluns jorullensis),* este último es utilizado a modo de cercas vivas alrededor de este sitio de aislamiento; en la zona media de este se encuentra un corredor ribereño con una gran variedad de árboles nativos de los cuales se menciona: chilca blanco (*Baccharis dracunculifolia)*, helechos (*Pteridium aquillinum*), mate *(Llex paraguariensis),* candelero *(Croton smithianus*) y moquillo *(Saurauia micayensis)*; el suelo en esta zona se halla completamente cubierto por grama.

El sistema agrosilvopastoril, como su nombre lo indica se halla en él una mezcla de pastos y especies vegetales tanto nativas como introducidas, como nativas están la chilca, mayo o siete cueros (*Machaerium capote*), laurel (*Laurus nobilis*), motilón (*Hyeronima macrocarp*), frijol tranca (*Phaseolus vulgaris* L), cidra (*Citrus medica*), y como introducidas está el aguacate (*Persea americana*), en medio de ellos se encuentra pasto imperial (*Axonopus scoparius*) sembrado con curvas de nivel, así como también se ubica en esta parte algunos frutales: durazno (Prunos persica), lulo (Solanum quitoense), chilacuan (Vasconcellea pubenscens), breva (*Ficus carica*), curuba (*Passiflora tarminiana*), manzana (*Malus domestica*), limón (*Citrus limonum*), caña (*Saccharum officinarum*). Dentro de ello se sitúa un lugar para la preparación de abonos orgánicos, de los que son utilizados en la finca para la fertilización, además dispone de un espacio para árboles en su mayoría aliso en donde se realiza un riego con aguas residuales después de pasar por procesos de sedimentación para su debida fertilización, otra para plantas aromáticas y por ultimo una huerta casera hallándose en ella coles (*Brassica oleracea*), repollo (*Brassica oleracea capitata*), cebolla (*Allium cepa*), ají (*Capsicum annuum*), arracacha (*Arracacia xanthorrhiza*)

En la finca La Maravilla dentro de los ecosistemas transformados se encontraron diversos sistemas que benefician el bienestar humano, los cultivos transitorios que comprenden las áreas ocupadas con cultivos cuyo ciclo vegetativo es menor a un año, llegando incluso a ser de sólo unos pocos meses; por otro lado la calidad de aire y control biológico poseen un nivel de significancia moderado, debido a que oscila entre valores de 15 – 29,99, se deduce r que en la alimentación existe una dimensión social ya que el beneficio que ofrece es de autoabastecimiento cabe resaltar que los productos que originalmente la naturaleza proporcionó al hombre para satisfacer sus necesidades, calóricas principalmente, alcanzaron la categoría de alimento cuando el hombre los produjo en abundancia y facilitó su acceso para disponer de ellos en el momento que así lo requiriera (Bourges citado por Castro, 1999).

Tabla 7. Matriz de doble entrada para la finca La Maravilla. Fuente: Esta investigación.

FINCA 1. LA MARAVILLA																																		
TIPO DE SERVICIOS ECOSISTEMICOS	FUNCIONES AMBIENTALES DE LOS ECOSISTEMAS	ECOSISTEMAS	TIPO I. ECOSISTEMAS TRANSFORMADOS.																															
			I.a Cultivos transitorios								I.b Cultivos permanentes								I.c Pastos								I.d Plantaciones forestales							
		BIENESTAR HUMANO	Va	Co	Of	Pem	Per	NS	I	Nsi	Va	Co	Of	Pem	Per	NS	I	Nsi	Va	Co	Of	Pem	Per	NS	I	Nsi	Va	Co	Of	Pem	Per	NS	I	Nsi
SERVICIOS ECOSISTEMICOS DE ABASTECIMIENTO O APROVISIONAMIENTO	Ecosistemas que satisfacen necesidades (sustento basico)	Alimentacion	S	1	5	1	5	5	17	M	S	1	5	5	5	5	21	M																
		Abastecimiento de agua																									A	5	5	10	10	10	40	IM
		Fuente de energia																									S	1	1	5	5	5	17	M
		Materias primas para construccion de vivienda																																
	Ecosistemas para productividad	Bienestar economico																																
		Actividades productivas agricolas y/o indistriales									E	5	5	5	5	5	25	M	A	1	1	1	10	5	18	M								
		Materias primas																																
	Ecosistemas proveedores de recursos naturales	Ganaderia																																
		Especies menores (cuyes)																	S	1	1	1	1	5	9	IR								
		Madera																																
		Extractos naturales de uso medicinal									S	1	1	5	5	5	17	M																
		Recursos geneticos																																
SERVICIOS ECOSISTEMICOS DE REGULACION Y SOPORTE	Ecosistemas para prevencion de riesgos (mecanismo de respuesta a eventos naturales	Control de inundaciones																																
		Control de deslizamientos																	A	1	5	5	5	5	21	M								
	Ecosistemas receptores de desechos (reducir la concentracion de contaminantes en el entorno)	Calidad del agua																																
		Calidad del aire	A	1	5	5	5	5	21	M	A	1	1	5	5	1	13	IR	A	1	5	1	10	5	22	M	A	1	1	5	5	1	13	IR
		Procesamiento de desechos y materia organica									A	1	1	5	5	1	13	IR	A	1	5	1	10	5	22	M	A	1	1	5	5	1	13	IR
	Ecosistemas para el equilibrio ecologico	Control biologico	A	1	5	1	5	5	17	M																								
		Mnatenimiento de la biodiversidad																																
		Regulacion de la erosion																	A	1	5	1	1	5	13	IR								
		Disponibilidad de nutrientes	A	1	5	10	10	5	31	IM	A	1	1	5	5	1	13	IR	A	1	5	10	10	5	31	IM								
		Mantenimiento de las condiciones climaticas																																
SERVICIOS ECOSISTEMICOS SOCIO-CULTURALES	Ecosistemas que abarcan beneficios recreativos y esteticos	Belleza escenica									A	1	5	10	10	5	31	IM																
		Recreacion y ecoturismo																																
	Ecosistemas asociados a la identidad, legado cultural y sentido de pertenencia de una region	Importancia espiritual	S	1	1	10	10	10	32	IM	S	1	1	10	10	10	32	IM																
		Importancia e identidad cultural																																

FINCA 1. LA MARAVILLA																		
TIPO DE SERVICIOS ECOSISTEMICOS	FUNCIONES AMBIENTALES DE LOS ECOSISTEMAS	ECOSISTEMAS	TIPO II. ECOSISTEMAS NATURALES TERRESTRES.								TIPO IV. ECOSISTEMAS NATURALES ACUATICOS							
			II.a Bosques								III.a Aguas continentales							
		BIENESTAR HUMANO	Va	Co	Of	Pem	Per	NS	I	IR	Va	Co	Of	Pem	Per	NS	I	Nsi
SERVICIOS ECOSISTEMICOS DE ABASTECIMIENTO O APROVISIONAMIENTO	Ecosistemas que satisfacen necesidades (sustento basico)	Alimentacion																
		Abastecimiento de agua									A	5	10	10	10	5	40	IM
		Fuente de energia																
		Materias primas para construccion de vivienda																
	Ecosistemas para productividad	Bienestar economico																
		Actividades productivas agricolas y/o indistriales																
		Materias primas																
	Ecosistemas proveedores de recursos naturales	Ganaderia																
		Especies menores (cuyes)																
		Madera																
		Extractos naturales de uso medicinal																
		Recursos geneticos																
SERVICIOS ECOSISTEMICOS DE REGULACION Y SOPORTE	Ecosistemas para prevencion de riesgos (mecanismo de respuesta a eventos naturales	Control de inundaciones																
		Control de deslizamientos																
	Ecosistemas receptores de desechos (reducir la concentracion de contaminantes en el entorno)	Calidad del agua	A	5	10	10	10	10	45	IM								
		Calidad del aire	A	5	10	10	10	10	45	IM								
		Procesamiento de desechos y materia organica																
	Ecosistemas para el equilibrio ecologico	Control biologico																
		Mnatenimiento de la biodiversidad	A	10	10	10	10	10	50	IM								
		Regulacion de la erosion																
		Disponibilidad de nutrientes	A	1	1	10	10	5	27	M								
		Mantenimiento de las condiciones climaticas	A	5	10	10	10	10	45	IM								
SERVICIOS ECOSISTEMICOS SOCIO-CULTURALES	Ecosistemas que abarcan beneficios recreativos y esteticos	Belleza escenica																
		Recreacion y ecoturismo																
	Ecosistemas asociados a la identidad, legado cultural y sentido de pertenencia de una region	Importancia espiritual																
		Importancia e identidad cultural																

ACODAL
ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
65° CONGRESO INTERNACIONAL
Agua, Saneamiento, Ambiente y Energías Renovables
Bogotá - Colombia
Centro de Convenciones Ágora
Julio 13, 14 y 15 de 2022

En cuanto a calidad de aire y control biológico se encontró que su dimensión es ambiental ya que estos generan un impacto favorable en el medio como captura de carbono, además mantiene un equilibrio en el edafón porque en este sitio no se realizan actividades de fumigación con agrotóxicos. Por otra parte también se encontró en este la disponibilidad de nutrientes con una dimensión ambiental por las técnicas amigables con el medio ambiente que se practican dentro de la finca como fertilización y aplicación de abonos orgánicos. Para (Jhonstom citado por Otiniano & Meneses, 2006), la cantidad de humus en el suelo depende de muchos factores, tales como la incorporación de nuevos restos orgánicos al suelo y su velocidad de oxidación química y biológica, la velocidad de descomposición de la materia orgánica existente ya en el suelo, la textura del suelo, la aireación, humedad y los factores climáticos. Las prácticas de manejo del cultivo también pueden tener un efecto sobre este parámetro, ya que, por ejemplo, el empleo de abonos minerales acelerara la descomposición de la materia orgánica en el suelo; al igual la importancia espiritual tiene una dimensión social porque en el momento de la siembra tienen en cuenta las fases lunares para una mejor producción, cada uno de ellos poseen un nivel de significancia importante con rangos entre 30 a 49,99.

En la siguiente unidad evaluada se encuentran los cultivos permanentes o perennes, son cultivos de productos agrícolas que se destinan a la alimentación humana y/o animal o para materias primas industriales u otros usos. Estos cultivos tiene un prolongado periodo de producción que permiten cosechas durante varios años, sin necesidad de ser sembrados después de cada cosecha (Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua, ESPAC, 2009), en este sitio se encuentra la alimentación que posee una dimensión social con nivel se significancia moderado porque su valor de importancia se encuentra entre el rango de 15 – 29,99 beneficiando de manera directa a las personas que habitan en la finca; la calidad de aire, procesamiento de desecho, materia orgánica y disponibilidad de nutrientes se encuentran con dimensión ambiental y un nivel de significancia irrelevante con valores entre 1 – 14,99, cada uno de ellos cumple un rol importante en este sistema porque en los diferentes cultivos, además de regular sustancias contaminantes del aire estos generan residuos los cuales mediante un proceso de descomposición y mineralización llegamos a lo que se conoce como materia orgánica y por ende existe gran disponibilidad de nutrientes.

Como tercera unidad están los pastos que son utilizados para la alimentación de especies menores como cuyes (*Cavia porcellus*) por tal razón tienen una dimensión social y un nivel de significancia irrelevante al igual que la regulación de la erosión, pero con dimensión ambiental ya que al ubicarse este sistema en pendiente se hizo uso de las curvas de nivel favoreciendo el control de deslizamientos este con dimensión ambiental y nivel de significancia moderado dentro de este mismo nivel se encuentra la calidad de aire y procesamiento de desechos y materia orgánica siendo estos importantes en la captura de carbono y los procesamiento de residuos para la generación de abonos orgánicos, lo cual beneficiando a la disponibilidad de nutrientes para un óptimo desarrollo de las plantas, además tiene efecto sobre las propiedades físicas del suelo, formando agregados y dando estabilidad estructural, uniéndose a las arcillas y formando el complejo de

cambio, favoreciendo el intercambio gaseoso (Graetz citado por Otiniano & Meneses, 2006) catalogado con un nivel de significancia importante y su dimensión ambiental dentro del rango de 30 – 49,99.

En la cuarta unidad se ubican las plantaciones forestales, en este caso se habla de que todo desarrollo que tenga como base los recursos forestales y otros recursos naturales debe hacerse en forma sostenible, en dicha unidad se genera como beneficio fuente de energía (leña) con dimensión social ya que su propietario hace uso mínimo de estas plantaciones en el momento en el que hayan cumplido su ciclo de vida en el ecosistema, además de la función que se menciona anteriormente estas ayudan al mejoramiento de la calidad del aire.

En cuanto al tipo de ecosistemas naturales terrestres, se encuentran los bosques que son cada vez más un recurso crítico para el desarrollo sostenible de los países por la creciente presión ejercida por la sociedad y la contribución de los servicios ecosistémicos del bosque a la sostenibilidad de varios sectores socioeconómicos (Leaño Sanabria, 2015), estos son de gran importancia a nivel ambiental ya que de acuerdo con (Pagiola, Landell, & Bishop, 2002), en lo que se refiere a la calidad de aire por la gran variedad de especies vegetales las cuales ayudan a la captura de sustancias contaminantes que mediante un proceso que realizan las plantas liberan oxígeno para purificación del aire y el mantenimiento de las condiciones climáticas, de igual manera el bosque mantiene y regula los flujos hidrológicos, en cuanto al procesamiento de desechos y materia orgánica se puede deducir que debido a procesos de mineralización que realizan los microorganismos presentes en el suelo la materia orgánica se encuentra en abundantes cantidades y por consiguiente la disponibilidad de nutrientes y su dimensión ambiental se encuentra en rango de 30 – 49,99.

Como último tipo de ecosistema natural acuático se encuentra la unidad de aguas continentales, generando como beneficio el abastecimiento de agua dentro de la finca, uno de los problema que aumenta día a día es la contaminación de los recursos hídricos tanto superficiales como subterráneos, lo que se hace necesario y urgente la protección de estos recursos ya que una vez contaminada una fuente de agua, es muy difícil y en ocasiones casi imposible su recuperación (IRENA, 1993), por este motivo el recurso agua es utilizado para actividades domésticas y agrícolas, por tal razón posee una dimensión ambiental y un nivel de significancia muy importante, ya que se realizan actividades que permiten la preservación de la fuente hídrica por encontrarse en el sistema de conservación aislado de contaminantes que puedan alterar su ciclo hidrológico.

El sistema agrosilvopastoril, como su nombre lo indica se halla en él una mezcla de pastos y especies vegetales tanto nativas como introducidas, como nativas están la chilca, mayo o siete cueros (*Machaerium capote*), laurel (*Laurus nobilis*), motilón (*Hyeronima macrocarp*), frijol tranca (*Phaseolus vulgaris L*), cidra (*Citrus medica*), y como introducidas está el aguacate (Persea americana), en medio de ellos se encuentra pasto imperial (*Axonopus scoparius*) sembrado con curvas de nivel, así como también se ubica

en esta parte algunos frutales: durazno (*Prunos persica*), lulo (*Solanum quitoense*), chilacuan (*Vasconcellea pubenscens*), breva (*Ficus carica*), curuba (*Passiflora tarminiana*), manzana (*Malus domestica*), limón (*Citrus limonum*), caña *(Saccharum officinarum*). Dentro de ello se sitúa un lugar para la preparación de abonos orgánicos, de los que son utilizados en la finca para la fertilización.

De la misma forma se evaluaron los 9 agrosistemas determinando claramente los servicios ecosistemicos que prestan, determinado que el número 4 es el que mayores problemas ambientales presenta.

CONCLUSIONES

En las comparaciones que se realizaron en la evaluación de servicios ecosistémicos se encontró que el sistema convencional adoptado por parte de los propietarios en algunas fincas ha llevado al deterioro y a la minimización de recursos naturales, además los bienes y servicios que proveen estos en relación al bienestar humano son limitados, de tal forma en el medio ambiente se va generando un desequilibrio ambiental por la contaminación de fuentes hídricas, suelo, aire, flora y fauna, y por la intervención que el hombre ha hecho a los ecosistemas con el propósito de la expansión ganadera y agrícola como se pudo apreciar en la finca perteneciente al señor Antonio España, en donde existe un grado de contaminación alto a los diferentes sistemas establecidos por las practicas anteriormente mencionadas.

El grado de influencia que existen por parte de las actividades antrópicas es suficientemente importante ya que de ellas depende que el estado de las propiedades del agua se conserven o en caso contrario se alteren generando impactos negativos como contaminación con sustancias toxicas, aguas residuales, y excretas de animales, afectando el bienestar de las futuras generaciones, cabe resaltar que algunas de las propiedades fisicoquímicas del agua no se han alterado en su totalidad debido a los aislamientos que se han realizado por parte de los propietarios, de igual manera son muy bajos los valores de contaminación, según los datos obtenidos en laboratorio los parámetros evaluados dan a conocer que la fuente hídrica es apta para su captación, porque no hay gran influencia por parte de los propietarios de las fincas aledañas a la microcuenca y por los aislamientos que se han venido implementado para evitar su contaminación.

Referencias bibliográficas

Aguilera citado por Huerta Cantera, H. E. (07 de 12 de 2010). *www.geociencias.unam.mx.* Querétaro. Obtenido de www.geociencias.unam.mx: http://www.geociencias.unam.mx/~bole/eboletin/tesisHilda1101.pdf

Arboleda G, J. (5 de diciembre de 2008). *www.kpesic.com.* Obtenido de www.kpesic.com: http://www.kpesic.com/sites/default/files/Manual_EIA_Jorge%20Arboleda.pdf

Arrazcaeta, L. O. (3 de septiembre de 2002). *www.redalyc.org.* Obtenido de www.redalyc.org: http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=209118292006

Arshad, M., Lowery, B., & Grossman, B. (1996). *Physical tests for monitoring soil quality.* USA: Madison.

Barrenechea Martel, Q. (S.F). www.bvsde.paho.org. Obtenido de www.bvsde.paho.org: http://www.bvsde.paho.org/bvsatr/fulltext/tratamiento/manualII/tomoI/uno.pdf

Buckman, H., & Brady, N. (1977). Naturaleza y propiedades de los suelos. España.

Hossne G., A. (2008). LA DENSIDAD APARENTE Y SUS IMPLICACIONES AGRÍCOLAS EN EL PROCESO. Terra Latinoamericana, 195-202.

(PIAF), P. d. (1998). www.condesan.org. Obtenido de www.condesan.org: http://www.condesan.org/e-foros/paramos2/Ponencia%20RHsemana2.htm

aguamarket. (s.f). www.aguamarket.com. Obtenido de www.aguamarket.com: http://www.aguamarket.com/sql/temas-interes/025.asp

Balvanera, P., & Cother, H. (2007). Acercamiento al estuido de los servicios ecosistemicos. *Instituto nacional de ecologia*, 15.

Balvanera, Patricia; Cotler, Helena. (6 de julio-diciembre de 2007). *www.redalyc.org.* Obtenido de www.redalyc.org: http://www.redalyc.org/pdf/539/53908512.pdf

BOELS 1982, D., KLUTE 1982, A., CENTURION, J. F., & DEMATTÉ 1985, J. L. (s.f.). *www.bdigital.unal.edu.co.* Obtenido de www.bdigital.unal.edu.co: http://www.bdigital.unal.edu.co/2242/1/70060838.2002.pdf

Bourges citado por Castro, M. (1999). *www.redalyc.org.* Obtenido de www.redalyc.org: http://www.redalyc.org/html/104/10401706/

Buckman citado por Huerta Cantera, H. E. (07 de 12 de 2010). Septiembre,México. Obtenido de www.geociencias.unam.mx: http://www.geociencias.unam.mx/~bole/eboletin/tesisHilda1101.pdf

Buckman, H., Brady, N., & citado por Huerta Cantera, H. E. (07 de 12 de 2010). Obtenido de http://www.geociencias.unam.mx/~bole/eboletin/tesisHilda1101.pdf

Canfield et al citado por Hernández Plaza, E. (2013). *www.revistaecosistemas.net.* Obtenido de www.revistaecosistemas.net: http://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/viewFile/757/686

Castañeda, C. (2013). *repository.unimilitar.edu.co.* Obtenido de repository.unimilitar.edu.co: http://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/10654/10960/2/Dise%C3%B1o%20de%20una%20metodolog%C3%ADa%20para%20evaluar%20el%20estado%20de%20los%20Servicios%20Ecosist%C3%A9micos.pdf

Castro, J. d., & Martinez, E. A. (2008). *Formulacion del plan de gestión ambiental del minicipio de Sibundoy.* San Juan de Pasto.

Cavazos, T., Rodriguez, O., & Rodriguez, J. (08 de 12 de 1992). *www.worldcat.org.* Obtenido de www.worldcat.org: http://www.worldcat.org/title/manual-de-practicas-de-fisica-de-suelos/oclc/38019265

Constitucion Politica de Colombia. (1991). *wsp.presidencia.gov.co*. Obtenido de wsp.presidencia.gov.co: http://wsp.presidencia.gov.co/Normativa/Documents/Constitucion-Politica-Colombia.pdf

Courtis, C. (11 de 2009). *www.fian.org.* Obtenido de www.fian.org: http://www.fian.org/fileadmin/media/publications/2009_12_AzucarRojaDesiertosVerdes.pdf

Cumbre Mundial de la Alimentacion (FAO). (07 de 12 de 1996). *www.educacionbogota.edu.co.* Obtenido de www.educacionbogota.edu.co: http://www.educacionbogota.edu.co/archivos/Destacados/2013/simonu/FAO%20PARTE%202.pdf

Cumbre Mundial sobre la Alimentación. (1996). *ftp.fao.org/es.* Obtenido de ftp.fao.org/es: ftp://ftp.fao.org/es/ESA/policybriefs/pb_02_es.pdf

Daily citado por Viglizzo, E. F., & Carreño, L. V. (s.f). *ced.agro.uba.ar.* Obtenido de ced.agro.uba.ar: http://ced.agro.uba.ar/ubatic/sites/default/files/files/Capitulo_01.pdf

Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua, ESPAC. (2009). *www.inec.gob.ec.* Obtenido de www.inec.gob.ec: http://www.inec.gob.ec/publicaciones_libros/documentofinal1.pdf

FAO. (02 de 2011). *coin.fao.org.* Obtenido de coin.fao.org: http://coin.fao.org/coin-static/cms/media/10/13195641664990/barrerasfinal.pdf

FAO. (06 de 12 de 2016). *www.fao.org.* Obtenido de www.fao.org: http://www.fao.org/soils-portal/about/definiciones/es/

FAO citado por Rosa Martinez,Hilda Rivero. (12 de 2006). *Users/marcela/Downloads.* Obtenido de Users/marcela/Downloads: file:///C:/Users/marcela/Downloads/Dialnet-ImportanciaDeLasPlantacionesForestalesDeEucalyptus-2213988.pdf

Firbank, et al. (2008). Assessing the impacts of agricultural intensification on biodiversity: a British perspective. *The royal society publishing*.

Foley citado por Hernández Plaza, E. (abril de 2013). *www.revistaecosistemas.net.* Obtenido de www.revistaecosistemas.net: http://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/viewFile/757/686

Foley, et al. (2005). Global consequences of land use. *Pubmed*.

Forsyte, W., Gavande, S., & Gonzales, M. (1969). *Propiedades de los suelos derivados de cenizas volcanocas considerando algunos suelos de America Latina.* Costa Rica.

Forsythe, W. (1975). *Física de suelos : manual de laboratorio.* Costa Rica: San José.

Geiger et al. (2010). Efectos negativos persistentes de los pesticidas sobre la biodiversidad y el potencial de control biológico en las tierras agrícolas europeas. *Ecología básica y aplicada , 11 (2), 97-105*.

Gestión en Recursos Naturales. (07 de 12 de 2015). *www.grn.cl.* Obtenido de www.grn.cl: http://www.grn.cl/impacto-ambiental.html

Graetz citado por Otiniano, A., & Meneses, L. (04 de 2006). *www.scielo.cl.* Obtenido de www.scielo.cl: http://www.scielo.cl/pdf/idesia/v24n1/art09.pdf

Groot 2010 citado por Gutiérrez 2016, P. (s.f.). *www.redalyc.org.* Obtenido de www.redalyc.org: http://www.redalyc.org/pdf/171/17146265008.pdf

Gutiérrez González, P., Suárez Alonso, M., & Vidal Abarca Gutiérrez , M. (10 de 01 de 2016). *www.redalyc.org/.* Obtenido de www.redalyc.org/: http://www.redalyc.org/pdf/171/17146265008.pdf

IDEAM. (6 de JUNIO de 2010). *siatac.co.* Obtenido de siatac.co: http://siatac.co/c/document_library/get_file?uuid=a64629ad-2dbe-4e1e-a561-fc16b8037522&groupId=762

IRENA. (1993). *www.bvsde.paho.org.* Obtenido de www.bvsde.paho.org: http://www.bvsde.paho.org/bvsade/fulltext/cuencas.pdf

Jaramillo 2004, J., Burbano, F., & Cadena, W. c. (2009). *www.scielo.org.co.* Obtenido de www.scielo.org.co: http://www.scielo.org.co/pdf/rcia/v31n2/v31n2a09.pdf

Jaramillo J., D. F. (07 de 12 de 2002). *www.bdigital.unal.edu.co.* Obtenido de www.bdigital.unal.edu.co: http://www.bdigital.unal.edu.co/2242/1/70060838.2002.pdf

Jaramillo, D. (2002). *www.bdigital.unal.edu.co.* Obtenido de www.bdigital.unal.edu.co: http://www.bdigital.unal.edu.co/2242/1/70060838.2002.pdf

Jhonstom citado por Otiniano, A., & Meneses, L. (2006 de 2006). *www.scielo.cl.* Obtenido de www.scielo.cl: http://www.scielo.cl/pdf/idesia/v24n1/art09.pdf

Klute, A. (1986). *METHODS OF SOIL ANALYSIS.* Wisconsin USA: Madison.

Kosmus, M., Renner, I., & Ullrich, S. (06 de 10 de 2012). *www.giz.de.* Obtenido de www.giz.de: https://www.giz.de/expertise/downloads/giz2012-es-servicios-ecosistemicos.pdf

Laurance, W. (07 de 12 de 1999). *Users/marcela/Downloads.* Obtenido de Users/marcela/Downloads: file:///C:/Users/marcela/Downloads/502-956-1-SM.pdf

Leaño Sanabria, J. J. (11 de 2015). *www.revistasbolivianas.org.bo.* Obtenido de www.revistasbolivianas.org.bo: http://www.revistasbolivianas.org.bo/pdf/rvc/v6n10/v6n10_a08.pdf

Lugo, & Mendez citado por Hossne G, A. J. (08 de 2007). *www.scielo.org.mx.* Obtenido de www.scielo.org.mx: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792008000300001

Marcano, J. E. (07 de 12 de 2016). *www.jmarcano.com.* Obtenido de www.jmarcano.com: http://www.jmarcano.com/biografia/index.html

ME. (2005). Las relaciones entre el funcionamiento de los ecosistemas y el bienestar humano. *Revista cientifica y tecnica de ecologia y medio ambiente*.

MEA. (06 de 12 de 2005). *www.millenniumassessment.org.* Obtenido de www.millenniumassessment.org: http://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014). *biblovirtual.minambiente.gov.co:3000.* Obtenido de biblovirtual.minambiente.gov.co:3000: http://biblovirtual.minambiente.gov.co:3000/DOCS/MEMORIA/MADS-0026/MADS-0026.pdf

MINISTERIO DE SALUD PUBLICA . (10 de 03 de 1998). *www.emcali.com.co.* Obtenido de www.emcali.com.co: http://www.emcali.com.co/documents/10157/37675/(11)%20Decreto++475+de+1998.pdf

Montoya Hernandez, E., & Alvarez, J. A. (07 de 12 de s.f). *sites.google.com.* Obtenido de sites.google.com: https://sites.google.com/site/elaireysusreaccionesquimicas33/

Pagiola, Landell, & Bishop. (2002). *Users/marcela/Downloads.* Obtenido de Users/marcela/Downloads: file:///C:/Users/marcela/Downloads/95-185-1-SM.pdf

Pérez, R. (9 de julio de 2008). *www.scielo.org.mx.* Obtenido de www.scielo.org.mx: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0301-70362008000300011&lng=es&tlng=es

PNGIBSE. (06 de 12 de 2012). *www.humboldt.org.* Obtenido de www.humboldt.org.: http://www.humboldt.org.co/images/documentos/pdf/documentos/pngibse-espaol-web.pdf

PNGIBSE. (06 de 12 de 2012). *www.humboldt.org.co.* Obtenido de www.humboldt.org.co: http://www.humboldt.org.co/images/documentos/pdf/documentos/pngibse-espaol-web.pdf

Proyecto Ganaderia Colombiana Sostenible. (06 de 12 de 2011). *www.cipav.org.co.* Bogota. Obtenido de www.cipav.org.co: http://www.cipav.org.co/pdf/4.Servicios.Ambientales.pdf

PROYECTOS SANITARIOS DE POTABILIZACIÓN. (S.F). *www.ucpypfe.gov.ar.* Obtenido de www.ucpypfe.gov.ar: http://www.ucpypfe.gov.ar/BirfPIHNG/IEA-PmpaAnexo3.pdf

Radulovich, R. (10 de 2008). *www.mag.go.cr.* Obtenido de www.mag.go.cr: www.mag.go.cr/rev agr/inicio.htm

Romero, F. I., Cozano, M. A., & Gangas, R. A. (2014). *mingaonline.uach.cl.* Obtenido de mingaonline.uach.cl: http://mingaonline.uach.cl/pdf/bosque/v35n1/art01.pdf

Romero, J. (07 de 12 de 2002). *unad.edu.co.* Obtenido de unad.edu.co: http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358002/Abastecimiento_Contenido_en_linea/leccin_19_anlisis_qumico.html

Sanchez, P., & Salinas, J. (1983). *Suelos ácidos: Estrategias para su manejo con bajos insumos en América Tropical.* Bogota: SCCS.

Secretaria de Medio Ambiente y recursos naturales. (2004). *Introducción a los servicios ambientales. Mexico.* México.

Secretaría del Convenio sobre la Diversidad Biológica. (3 de octubre de 2004). *www.cbd.int.* Obtenido de www.cbd.int: https://www.cbd.int/doc/publications/ea-text-es.pdf

Sierra, J. H., (citado por Ospina Valdes, A. M., & Nieto Roa, L. M. (07 de 12 de 2009). *repositorio.utp.edu.c.* Obtenido de repositorio.utp.edu.c: http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/1785/66108O83.pdf?sequence=1

Smith et al citado por Hernández Plaza, E. (2013). *www.revistaecosistemas.net.* Obtenido de www.revistaecosistemas.net: http://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/viewFile/757/686

Solbrig, O. (07 de 12 de 1994). *www.ecotips.com.mx.* Obtenido de www.ecotips.com.mx: http://www.ecotips.com.mx/Bioconservacion/NunezGlezBarahona.pdf

Somer C. (08 de 12 de 1979). *www.scielo.org.v.* Obtenido de www.scielo.org.v: http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442003000600007

Sposito. (07 de 12 de 1989). *www2.inecc.gob.mx.* Obtenido de www2.inecc.gob.mx: http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/459/cap1.html

TURNER, M., & RH GARDNER & RV O´NEILL. 2001. Landscape ecology in theory and practice: pattern and process. Springer-Verlag, N. Y. (s.f.).

Turner, M., Gardner, R., & O'Neill, R. (2011). *LANDSCAPE ECOLOGY IN THEORY AND PRACTICE.* New York: WordCrafters . Obtenido de http://download.springer.com/static/pdf/998/bfm%253A978-0-387-21694-2%252F1.pdf?originUrl=http%3A%2F%2Flink.springer.com%2Fbook%2Fbfm%3A978-0-387-21694-2%2F1&token2=exp=1481060884~acl=%2Fstatic%2Fpdf%2F998%2Fbfm%25253A978-0-387-21694-2%25252F1.pdf%3Forigi

UNESCO. (07 de 12 de 2002). *www.jmarcano.com.* Obtenido de www.jmarcano.com: http://www.jmarcano.com/recursos/recursos.html

Vazquez, P., & Zulaica, L. (26 de 06 de 2013). *www.scielo.br.* Obtenido de www.scielo.br: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1982-45132013000300008

www.bvsde.paho.org. (01 de 2004). Obtenido de www.bvsde.paho.org: http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/CD11/calidad.pdf

ACODAL
ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
65° CONGRESO INTERNACIONAL
Agua, Saneamiento, Ambiente y Energías Renovables
Bogotá - Colombia
Centro de Convenciones Ágora
Julio 13, 14 y 15 de 2022

Comparación de la huella hídrica para dos sistemas de riego el cultivo de cebolla de bulbo (Allium cepa sp.) en Samacá-Boyacá.

G.E. Cely[1]* I.Walteros Torres [2], C. Fernández Pérez [2], F. Camargo [2].

[1]Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
[2] Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
[*]*Autor corresponsal:* Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Avenida Central del Norte 39-115. Tunja, Boyacá. 150001. Colombia. Email: german.cely@uptc.edu.co

Abstract

The water footprint of a crop consists of: effective precipitation consumed during crop growth (green water footprint), irrigation water consumed in crop production (blue water footprint) and the amount of fresh water required to assimilate the pollution caused by growing the crop to satisfy local water (Grey Water Footprint). The objective of the research was to determine the water footprint for two irrigation systems in the cultivation of bulb onion (Allium cepa sp.) in Samacá-Boyacá. The CropWat 8.0 program was used to calculate the blue and green water footprints in the crop cycle. The results of the total water footprint were higher in the drip irrigation system with 319.35 $m^3.t^{-1}$. with a yield of 48.6 $m^3.t^{-1}$. and the sprinkler irrigation system was 206.14 $m^3.t^{-1}$ with a yield of 47.05 $m^3.t^{-1}$. The water footprint values per component were for sprinkler irrigation of 90.07 $m^3.t^{-1}$ blue WF, 80.40 $m^3.t^{-1}$ of green footprint and 35.67 $m^3.t^{-1}$. of gray WF. While in drip irrigation, the values for the water footprint by component were blue WF 93.88 $m^3.t^{-1}$, green WF 78.71 $m^3.t^{-1}$ and gray WF 146.76 $m^3.t^{-1}$. Improving green water utilization rate or reducing blue water use in crop planting structure planning can save irrigation water without reducing crop yield.

KeyWords: Blue water footprint, CropWat, Gray water footprint, Green water footprint, Water,

ACODAL
ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
65° CONGRESO INTERNACIONAL
Agua, Saneamiento, Ambiente y Energías Renovables
Bogotá - Colombia
Centro de Convenciones Ágora
Julio 13, 14 y 15 de 2022

COMPARACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA PARA DOS SISTEMAS DE RIEGO EL CULTIVO DE CEBOLLA DE BULBO (*ALLIUM CEPA SP.*) EN SAMACÁ-BOYACÁ.

Resumen

La huella hídrica de un cultivo, consiste en la: precipitación efectiva consumida durante el crecimiento del cultivo (Huella hídrica verde), el agua de riego consumida en la producción del cultivo (Huella hídrica azul) y la cantidad de agua dulce requerida para asimilar la contaminación causada por el crecimiento del cultivo para satisfacer el agua local (Huella hídrica gris). El objetivo de la investigación fue determinar la huella hídrica para dos sistemas de riego en el cultivo de cebolla de bulbo (Allium cepa sp.) en Samacá-Boyacá. Se utilizo el programa CropWat 8.0 para calcular las huellas hídricas azules y verdes, en el ciclo del cultivo. Los resultados de la huella hídrica total fueron más altos en el sistema de riego por goteo con 319.35 $m^3.t^{-1}$ con un rendimiento de 48.6 $t.ha^{-1}$ y el sistema de riego por aspersión fue de 206.14 $m^3.t^{-1}$ con un rendimiento de 47.05 t. ha^{-1}. Los valores de la huella hídrica por componente, fueron para el riego por aspersión de 90.07 $m^3.t^{-1}$ HH azul, 80.40 $m^3.t^{-1}$ de huella verde y de HH gris de 35.67 $m^3.t^{-1}$. Mientras que en riego por goteo los valores para huella hídrica por componente fueron HH azul 93.88 $m^3.t^{-1}$, HH verde 78.71 $m^3.t^{-1}$ y HHgris de146.76 $m^3.t^{-1}$. La mejora de la tasa de utilización de agua verde o la reducción del uso de agua azul en la planificación de la estructura de plantación de cultivos puede ahorrar agua de riego sin reducir el rendimiento de los cultivos.

Palabras clave: Agua, CropWat, Huella hídrica Azul, Huella hídrica Gris, Huella hídrica Verde.

Introducción

A nivel mundial, la actividad agrícola usa alrededor del 70% de toda el agua consumida en el planeta (Romero et al., 2016a). Para los próximos años se espera que la cantidad de agua necesaria para producir los alimentos, fibras y biocombustibles requeridos por la población se incrementará hasta en un 55% debido al aumento poblacional y al cambio en los patrones de consumo ((ONU, 2014). Los suelos y agua son recursos estratégicos que contribuyen a la seguridad alimentaria y la generación de servicios ecosistémicos. Puntualmente en el caso de la agricultura de riego, su práctica permite obtener dos o tres cosechas al año en la

misma parcela, lo que hace a las áreas irrigadas de gran importancia para la seguridad alimentaria mundial (Medina et al., 2016).

Por su parte Colombia es uno de los países con mayor recurso hídrico (IDEAM, 2015); sin embargo, este recurso cada día se ve más amenazado por la falta de planeación política y organizativa que conlleva a utilizarlo de forma indiscriminada. Según el ENA (2018), la demanda total de agua en el país entre 2012 y 2016 registró un incremento de 5 por ciento, al ascender a los 37.308 millones de metros cúbicos, siendo la agricultura el sector que mayor uso hace de los recursos hídricos frente al sector energía (21.6%), pecuario (8.5%) y doméstico (8.2%) ((Uribe et al., 2012). Este sector económico, es uno de los más importantes que se desarrollan en el país y que en 2018 aportó 4,28% al Producto Interno Bruto (PIB) nacional, consume el 43,1% del total de agua usada en Colombia, porcentaje que, si bien es alto, también evidencia una reducción frente a hace una década cuando era superior al 50 % (IDEAM, 2019).

La huella hídrica (HH) es un indicador en el ámbito mundial por ser la principal herramienta para identificar de manera cuantitativa la relación del hombre con el agua, y sus posibles impactos sobre el recurso hídrico (Díaz Fonseca et al., 2016). Este indicador tiene en cuenta los usos directos e indirectos del agua y tiene especificidad espacio-temporal ((Hoekstra et al., 2011). La huella hídrica tiene tres componentes, dos de ellos asociados a la cantidad de agua (verde y azul) y uno a la calidad del agua (gris) (IDEAM, 2015). La HH de un cultivo, consiste en la HH hídrica verde: la precipitación efectiva consumida durante el crecimiento del cultivo, HH azul: el agua de riego consumida en la producción del cultivo y HH gris: la cantidad de agua dulce requerida para asimilar la contaminación causada por el crecimiento del cultivo para satisfacer el agua local (Gao et al., 2021). Cuantificar la HH en sistemas agrícolas es importante, porque permite: conocer el uso y consumo de agua, generar consciencia de dónde y cómo se está utilizando el recurso hídrico, identificar los riesgos potenciales a los que se enfrenta un sistema productivo bajo un escenario de déficit hídrico, tomar mejores decisiones sobre cómo manejar el recurso hídrico y gestionar procesos, participar en políticas locales y nacionales de sostenibilidad ambiental y productiva que permitan reglamentar acciones concretas para su ahorro ((Romero et al., 2016).

La cebolla (*Allium cepa* L.) es la especie de la familia *Alliaceae* más cultivada y más importante desde el punto de vista del volumen consumido y del valor económico de su producción, está considerada como una hortaliza importante por su sabor

distintivo en numerosos platillos de la gastronomía mundial (Reveles et al., 2013). En Colombia se reportó en el año 2019 una producción nacional de 290.640,9 toneladas en un área de 14.332,15 ha y un rendimiento de 20,28 t ha^{-1} (Agronet & Minagricultura, 2022). Boyacá, participó en la producción nacional para el año 2020 con el 39.83%, 138.441,6 toneladas en un área de 5.707,8 ha y un rendimiento de 24,25 t ha^{-1}. La producción en Samacá para el año 2020 fue de 16.280 toneladas con un rendimiento de 22 tha^{-1} y un área sembrada de 740 ha (Agronet & Minagricultura, 2022). Teniendo en cuenta lo anterior, el objetivo de esta investigación fue determinar la huella hídrica para dos sistemas de riego en el cultivo de cebolla de bulbo (*Allium cepa sp.)* en Samacá-Boyacá.

Material y Metodología

La investigación se realizó en la vereda Tibaquirá sector Valle Centro del municipio de Samacá como se observa en la Figura 1. A una altura de 2.660 m.s.n.m y una temperatura media de 12 -16 ºC, con coordenadas N 5° 31’53.98’’ y W 73°29’15.7’’. En la parcela experimental se instalo una estación climática portátil.

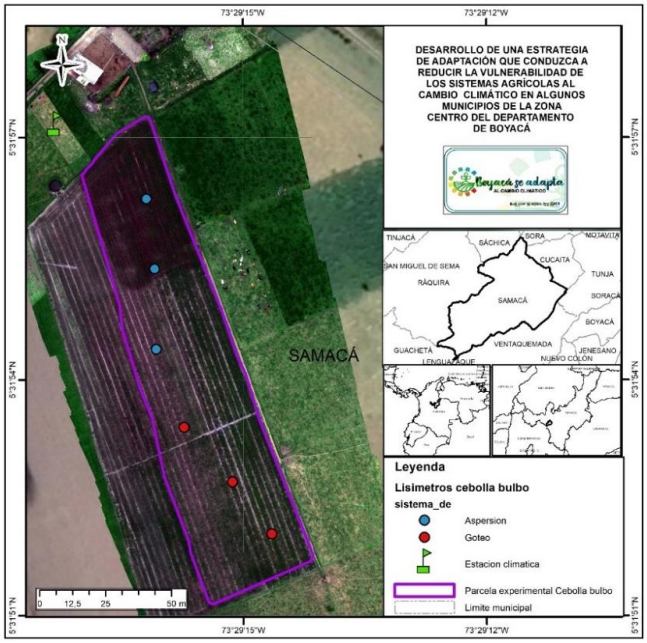


Figura 1. Ubicación parcela experimental cebolla de bulbo, Samacá.

Calculo huella hídrica.

El cálculo de la huella hídrica (HH) se cuantificó en la fase agrícola del cultivo de Cebolla de bulbo (*Allium cepa L*) en el municipio de Samacá.

Huella hídrica azul.

El componente azul de la huella hídrica (HHazul, [$m^3 \cdot ton^{-1}$]) en el proceso de crecimiento de un cultivo, según el manual de huella hídrica (Hoekstra, 2017) se calcula como el componente azul en el uso de agua de los cultivos (CWU [$m^3 \cdot ha^{-1}$] por sus siglas en ingles Crop Water Use) dividido por el rendimiento del cultivo (Y [$t \cdot há^{-1}$]), en este documento se va tomar la sigla UAC (Uso de Agua del Cultivo). El manual de huella hídrica señala que el UAC se calcula en el teniendo en cuenta la acumulación de la evapotranspiración diaria (ET, $mm \cdot día^{-1}$) durante el período de crecimiento completo. En general, esta variable toma en cuenta elementos del clima, edáficos y la de lámina de riego aplicada.

$$\text{Huella Hídrica Azul } = \left(\frac{\text{UAC}}{\text{y}}\right) * \#\, Hectareas \; = Volumen/masa$$

Ecuación (1)

$$\text{UAC} = 10 * \sum_{d=1}^{LPC} EVTazul\ [volumen]$$

Ecuación (2)

Donde:
EVTazul es la evapotranspiración de agua azul. El factor 10 convierte la profundidad del agua medida en mm a volúmenes de agua de superficie en $m^3 \cdot ha^{-1}$. LPC representa el largo del periodo de cultivo, comprendido entre el día de la siembra hasta el día de la cosecha.
Y: rendimiento del cultivo expresado en toneladas/ha

Huella hídrica verde.

Para su estimación se tomó como referencia los resultados de precipitación efectiva (PRECe) por el método de la USDA que utiliza el software Cropwat. La precipitación efectiva es la parte de la cantidad total de precipitación que retiene el suelo para que esté potencialmente disponible para satisfacer las necesidades de agua del cultivo. A menudo es menor que la precipitación total porque el cultivo no puede

apropiarse de toda la lluvia, por ejemplo, debido a la escorrentía superficial o la percolación. La fórmula utilizada es la siguiente:

$$\text{Huella Hídrica Verde } = \left(\frac{\text{PRECe}}{\text{y}}\right) * \#\text{ Hectareas } = \text{Volumen/masa}$$

Ecuación (3)

Donde:
PRECe: corresponde a la precipitación en mm
Y: rendimiento del cultivo expresado en toneladas/ha

Huella hídrica gris.

Las sustancias químicas en el agua lixiviada dependen de los factores ambientales, de suelo y manejos agronómicos que se presentan en la zona. Los contaminantes referenciados por lo general a los sistemas agrícolas son los residuos de fertilización y pesticidas, por eso la importancia del buen uso y manejo (Franke et al., 2013). Para el cálculo de la HHg se tomó como referencia la metodología aplicada por (Franke et al., 2013). En términos generales la HHg se calcula dividiendo la carga contaminante que entra en un cuerpo de agua**,** sobre la diferencia entre el nivel máximo permisible de un contaminante y la concentración natural del mismo**.** A continuación, se presenta la fórmula para el cálculo de HHg.

$$Huella\ hídrica\ Gris = \left(\frac{(\propto * AR)/(Cmax - Cnat)}{\text{y}}\right) \#\ \text{Hectareas } = volumen/masa$$

Ecuación (4)

Donde:
α: Por la falta de datos específicos a cada cultivo sobre el porcentaje del químico aplicado que lixivia hasta alcanzar agua dulce se asumió el valor utilizado por Chapagain & Hoekstra (2011), de 10% para todos los fertilizantes.
AR: Cantidad aplicada de producto químico para el campo por hectárea (kg/ha)
Cmax =concentración máxima aceptable de productos químicos aplicados en el cultivo. Se utilizaron como valores de referencia los establecidos por la normatividad colombiana para calidad de agua. La Resolución 2115 del 2007 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial establece los valores máximos permisibles de sustancias químicas relacionadas con plaguicidas y fertilizantes.

Para este caso los nitratos (NO_3) tienen un valor máximo de 10 (mg/L) y se utilizó como 0.01 Kg/m^3

Cnat = Es la concentración natural de los contaminantes. La concentración de una sustancia química en un cuerpo de agua sin intervención humana, en sistemas agrícolas hace referencia a la concentración de los nitratos principalmente en la lixiviación, según la fertilización aplicada. Tomando la metodología de (Chapagain & Hoekstra, 2011), se supuso que la pérdida de nitrato (NO_3) era el 20% de la aplicación total de N, para tasas de aplicación de N por debajo de 150 kg N. ha^{-1}, la pérdida supuesta del 10% de N a los cuerpos de agua dulce, estos indicadores sirven estimar la huella hídrica gris, de los cultivos. Para sustancias artificiales que no se presentan naturalmente en un ecosistema, el valor es de cero (Franke et al., 2013).

Y: rendimiento del cultivo expresado en toneladas/año.

En la tabla 1, se observa la fertilización edafica aplicada en cada sistema de riego.

Tabla 1. Fertilización edáfica para cada tratamiento

Fertilización edáfica Riego	60% Siembra			40% Reabone (inicio bulbificación)		
	N ($kg.h^{-1}$)	P ($kg.h^{-1}$)	K ($kg.h^{-1}$)	N ($kg.h^{-1}$)	P ($kg.h^{-1}$)	K ($kg.h^{-1}$)
Aspersión	50.4	88.92	41.76	97.44	37.12	162.4
Goteo	33.6	59.28	27.84	31.92	24.32	106.4

Fórmula de fertirrigación utilizada: (15 días después de emergencia hasta el día 60) y maduración (inicia día 61 hasta 30 días antes de la cosecha). En la tabla 2 se presenta la fórmula de fertirrigación utilizada en el tratamiento de riego por goteo.

Tabla 2. Fórmula de fertirrigación utilizada en el tratamiento de riego por goteo.

Fórmula (ppm)	**N**	**P_2O_5**	**K_2O**	**MgO**	**B**	**Cu**	**Fe**	**Mn**	**Zn**	**Mo**
Crecimiento	130	50	90	50	0,5	2	5	3	2	1
Maduración	120	45	170	45	1	2	5	3	2	1

Huella hídrica total.

Finalmente, una vez que se obtuvieron los datos concretos sobre las tres huellas hídricas individualizadas, se procedió a resolver la ecuación final que se ve a continuación.

$$\textit{Huella Hídrica total} = \textbf{HH verde} + \textbf{HH azul} + \textbf{HH gris} = \textit{vol/mas}$$

Ecuación (5)

Resultados y Discusión.

En lo referente a la cuantificación de cada uno de los componentes de la Huella Hídrica, se analiza la huella Verde, Azul y Gris en el cultivo de cebolla durante el ciclo de cultivo primer semestre de 2021. En la tabla 3. se presenta un resumen de los datos recolectados semanalmente de lixiviación por medio de los lisímetros, las láminas de riego aplicadas, los contenidos de humedad gravimétricos, precipitación y evapotranspiración calculada a partir de la información climática de la estación.

Tabla 3. Resultados de la cuantificación del agua durante el ciclo de cultivo.

Sem	Lix Got ml	Lix Asp ml	Lam Got mm	Lam Asp mm	HG % Got	HG % Asp	Prec. mm	Evtr. mm
1	5250	4850	0.00	0.00	-	-	23.4	22.03
2	5350	6000	21.07	27.52	-	-	18.8	24.6
3	3250	4500	21.07	18.07	-	-	6	26.6
4	422.5	472.5	27.52	27.52	26.83	36.03	3.60	24.11
5	780	755	10.53	9.03	36.17	34.59	6.00	30.54
6	642.5	4400	0.00	0.00	41.45	49.20	107.80	15.24
7	697.5	6270	10.53	9.03	34.97	34.59	47.40	16.70
8	490	1475	10.53	9.03	44.82	44.60	0.80	25.53
9	460	1090	21.07	18.07	28.96	37.01	1.60	27.29
10	660	2812.5	10.53	9.03	38.58	41.28	13.40	19.32

Sem	Lix Got ml	Lix Asp ml	Lam Got mm	Lam Asp mm	HG % Got	HG % Asp	Prec. mm	Evtr. mm
11	220	2865	10.53	9.03	33.28	39.01	10.40	23.90
12	735	7600	10.53	9.03	49.45	61.14	35.80	19.97
13	1840	3165	10.53	9.03	39.15	43.47	23.4	20.82
14	2230	3165	21.07	18.07	41.23	53.02	2.40	23.05
15	2925	2800	10.53	9.03	35.01	47.92	1.80	23.16
16	562.5	2765	10.53	9.03	36.80	44.06	3.00	23.48
17	610	540	10.53	9.03	42.24	29.96	2.40	25.39
18	560	1665	21.07	18.07	31.44	36.22	9.60	22.59
19	40	17.5	0.00	0.00	28.89	35.07	0.20	23.29
20	500	470	0.00	0.00	27.59	28.73	13.20	17.73
Lix: Lixiviación; Got: Gotero; Asp: Aspersión; Lam: Lamina; HG: Humedad gravimétrica; Prec: Precipitación; Evtr: Evapotranspiración de referencia								

Una vez se ingresan las variables medidas en campo al programa cropwat, se obtienen los datos de ETc [mm.dec], que se toma como el valor de UAC en este caso se calcula para el sistema de riego por goteo y aspersión. También se obtiene el total de la precipitación efectiva, junto con esto y los datos ingresados de cultivo el programa realiza una estimación del Kc con base en la evapotranspiración de referencia que es pastos en óptimas condiciones y manejo. En la tabla 4 se muestra el resumen entregado por cropwat durante el ciclo de cultivo de la cebolla de bulbo, incorporando los resultados de goteo y aspersión.

Tabla 4. Datos estimados por Cropwat para el cálculo de la HH del cultivo.

Mes	Década	Estado	Kc	ETc Asp mm.dec^{-1}	ETc Got mm.dec	Prec. Efec mm.dec^{-1}
Ene	3	Inic	0.33	26.6	26.6	0.6
Feb	1	Inic	0.33	26.1	26.1	5.4
Feb	2	Inic	0.33	26.1	26.1	7.8
Feb	3	Inic	0.33	24.2	24.2	16.4
Mar	1	Inic	0.33	18.4	18.4	28.5
Mar	2	Inic	0.33	18.1	19.1	37.9

Mes	Década	Estado	Kc	ETc Asp mm.dec^{-1}	ETc Got mm.dec	Prec. Efec mm.dec^{-1}
Mar	3	Des	0.33	15.7	19.7	34.3
Abr	1	Des	0.42	18.2	21.2	28.5
Abr	2	Des	0.54	18.6	20.6	26
Abr	3	Des	0.66	22.7	24.4	26.9
May	1	Med	0.74	23.7	25.7	29
May	2	Med	0.74	22.4	25.4	29.9
May	3	Med	0.74	24.2	26.2	27.1
Jun	1	Med	0.74	22.1	24.1	24.6
Jun	2	Med	0.74	22.9	24.6	22.6
Jun	3	Med	0.74	23.1	25.1	16.7
Jul	1	Fin	0.72	23.6	25.6	8
Jul	2	Fin	0.64	21.6	23.6	1.3
Jul	3	Fin	0.56	21.1	23.1	5.7
Ago	1	Fin	0.51	4.4	6.4	1.3
Total				423.8	456.2	378.3

Nota: fuente Cropwat.

Huella hídrica azul.

El agua de riego que es evapotranspirada y la incorporada en el producto comercial se determina con base en la asignación de un porcentaje del total del agua que ingresa por riego y por precipitación, es decir, del total de agua evapotranspirada, una fracción corresponde a agua verde y otra a agua azul, al igual que con el agua incorporada en el producto. Allen et al. (2006), menciona que la evaporación de agua azul hace referencia al agua que se evapora durante el almacenamiento de agua (depósitos de agua artificiales), transporte (canales abiertos) y tratamiento (evaporación del agua caliente que no se recoge) (Romero et al., 2016b).

Desarrollando la metodología, se toma el valor UAC el de 423.8 mm/dec y se multiplica por el factor de conversión para que las unidades correspondan a $m^3.t^{-1}$. Los datos de rendimiento se tomaron el día de la cosecha. En las ecuaciones 5 y6 se presentan los resultados para la HH azul.

Riego por aspersión

$$\text{UAC} = 423.8 * 10 \frac{m3}{ha} = 4238 \frac{m3}{ha}$$

Ecuación (6)

$$\text{Huella Hídrica Azul} = (\frac{4238 \frac{m3}{ha}}{47.05 \frac{ton}{ha}}) * 1\ ha = 90.07\ m^3.t^{-1}$$

Ecuación (7)

Riego por goteo.

$$\text{UAC} = 456.2 * 10 \frac{m3}{ha} = 4562 \frac{m3}{ha}$$

Ecuación (8)

$$\text{Huella Hídrica Azul} = (\frac{4562 \frac{m3}{ha}}{48.6 \frac{ton}{ha}}) * 1\ ha = 93.88\ m^3.t^{-1}$$

Ecuación (9)

Según los resultados la cantidad de agua que consumió el cultivo proveniente del riego (HH azul) durante su ciclo de crecimiento y desarrollo, es decir desde la siembra hasta la cosecha en el sistema de riego por aspersión fue de 90.07 $m^3.t^{-1}$ y en el sistema de riego por goteo fue de 93,88 $m^3.t^{-1}$. Se observa una tendencia similar en los resultados, sin embargo, el riego por goteo obtuvo un mayor con una diferencia de 3.81 $m^3.t^{-1}$. Los valores son bajos comparados con los de Higuera & Jaimes (2019) , reportaron valores 107 $m^3.t^{-1}$ para la huella hídrica azul. La demanda y la huella hídricas azul agrícola se concentra en los cultivos de arroz de riego y maíz, que representan más del 80 % del total estimado para el componente azul y la demanda hídrica (IDEAM 2019). Estudios reportan que los requisitos hídricos para la cebolla oscilan entre 225 y 1040 mm para producir un rendimiento promedio entre 10 y 77 t ha^{-1}, teniendo en cuenta diferentes ubicaciones, condiciones de suelo, características agroclimáticas y sistemas de riego de diversa eficiencia (Pérez Ortolá & Knox, 2015).

Huella hídrica verde.

Se toma el resultado de precipitación efectiva (378.3 $mm.dec^{-1}$) calculada por cropwat con la información de precipitación diaria del cultivo y datos de suelo. Se utiliza el factor de conversión, para ajustar unidades.

Riego por aspersión.

$$\text{Precipitación efectiva} = 378.3 * 10 \frac{m3}{ha} = 3783\ m^3.t^{-1}$$

Ecuación (10)

$$\text{Huella Hídrica verde} = \left(\frac{3783 \frac{m3}{ha}}{47.05 \frac{ton}{ha}}\right) * 1ha = 80.40\ m^3.t^{-1}$$

Ecuación (11)

Riego por goteo.

$$\text{Precipitación efectiva} = 378.3 * 10 \frac{m3}{ha} = 3783\ m^3.t^{-1}$$

Ecuación (12)

$$\text{Huella Hídrica verde} = \left(\frac{3783 \frac{m3}{ha}}{48.06 \frac{ton}{ha}}\right) * 1ha = 78.71 m^3.t^{-1}$$

Ecuación (13)

La HH verde para el sistema por aspersión fue de 80.40 $m^3.t^{-1}$ y para riego por goteo de 78.71 $m^3.t^{-1}$. Por su parte, Higuera & Jaimes (2019) , reportaron valores de 151 $m^3.t^{-1}$ para a huella hídrica verde en cebolla de bulbo. La huella hídrica verde del área agrícola del país se agrupa en tres cultivos principales: arroz de riego, arroz secano mecanizado y maíz, que representan el 79 % del componente verde (IDEAM 2019). Autores como Léllis et al. (2022), mencionan que para el caso de HH verde, el clima influye mucho en la magnitud de HH Azul, porque en las zonas donde las precipitaciones suplen la totalidad o la mayor parte de los requerimientos hídricos del cultivo, este indicador debe tender a cero.

Huella hídrica gris.

Para el IDEAM (2019), las aguas lixiviadas contienen aditivos agrícolas (incluidos cationes tóxicos, nutrientes, herbicidas y pesticidas) y contaminantes naturales que, sin riego, no se habrían movilizado. Las llegadas de los agroquímicos a las corrientes hídricas pueden provocar mortandad en peces, intoxicación en seres humanos, bioacumulación en los sedimentos, eutrofización en cuerpos lenticos, entre otras afectaciones.

Se tomo como referencia el 20% de la cantidad de kg. ha^{-1} de nitrógeno aplicado durante la fertilización: para riego por aspersión 147.84 $kg.ha^{-1}$ y para riego por goteo de 342.47 $kg.ha^{-1}$ (Tabla 2 y 3).

Riego por aspersión.

$$Huella\ hídrica\ Gris = \left(\frac{0.1 * 162.4 \frac{Kg}{ha}}{\frac{0.01 \frac{Kg}{m3} - 0.000324 \frac{Kg}{m3}}{47.05 \frac{ton}{ha}}} \right) * 1\ ha = 35.67\ \mathrm{m^3.\ t^{-1}}$$

Ecuación (14)

Riego por goteo.

$$Huella\ hídrica\ Gris = \left(\frac{0.1 * 223.6 \frac{Kg}{ha}}{\frac{0.01 \frac{Kg}{m3} - 0.00683 \frac{Kg}{m3}}{48.06 \frac{ton}{ha}}} \right) * 1\ \mathrm{ha} = 146.76\ m^3.\ t^{-1}$$

Ecuación (15)

Para el sistema de producción de cebolla de bulbo en el municipio de Samacá se obtuvo una HH gris de 35.67 $m^3.t^{-1}$ para riego por aspersión y de 146.76 $m^3.t^{-1}$ para riego por goteo. Este incremento está relacionado con la fertilización, ya que los kg. ha^{-1} de nitrógeno (342.47 kg. ha^{-1}) aplicados fueron mayores al de aspersión. Los valores fueron bajos comparados con los de Higuera & Jaimes (2019) , con 332 $m^3.t^{-1}$ para la huella hídrica gris.

Huella hídrica Total.

El resultado de la huella hídrica total para el sistema de producción de cebolla de bulbo en el municipio de Samacá fue de 206.14 $m^3.t^{-1}$ para riego por aspersión con un rendimiento de 47.05 t. ha^{-1} y de 319.35 $m^3.t^{-1}$ para riego por goteo con un rendimiento de 48.6 t. ha^{-1} como se observa en la figura 2. Los datos obtenidos en el proyecto son bajos comparados con los reportados por Higuera & Jaimes (2019) , quienes obtuvieron HH total 590 $m^3.t^{-1}$. Novoa et al. (2019), reportaron valores para cebolla fresca de 36 $m^3.t^{-1}$. La HH total, está influenciada principalmente por la temperatura y la precipitación. Un preciso conocimiento del comportamiento climático puede generar manejos adecuados que permitan un proceso de adaptación más rápido o incluso un nuevo modelo (Y. Zhang et al., 2015).

Los datos de HH gris (146.76 $m^3.t^{-1}$) fueron los que más contribuyeron a la huella hídrica total en riego por goteo, ya que en riego por aspersión fue de 35.67 $m^3.t^{-1}$. A su vez la huella hídrica para el cultivo de cebolla de bulbo, en relación con la HH

azul y la HH verde fue de 170,47 $m^3.t^{-1}$ en riego por aspersión y de 172,59 $m^3.t^{-1}$ en riego por goteo como se observa en la Figura 2. Datos reportados en el ámbito internacional, la estimación de la huella hídrica total es mayor a la obtenida por Cerpa y Gleen (2018) para Perú (108.8 $m^3.t^{-1}$), huella hídrica azul 76.28 $m^3.t^{-1}$, huella hídrica verde 0.43 $m^3.t^{-1}$ y huella hídrica gris 32.1 7 $m^3.t^{-1}$ esta última similar a la de riego por aspersión (35.67 $m^3.t^{-1}$) mientras que en riego por goteo se observa una tendencia alta con 146,76 $m^3.t^{-1}$ (Figura 2).

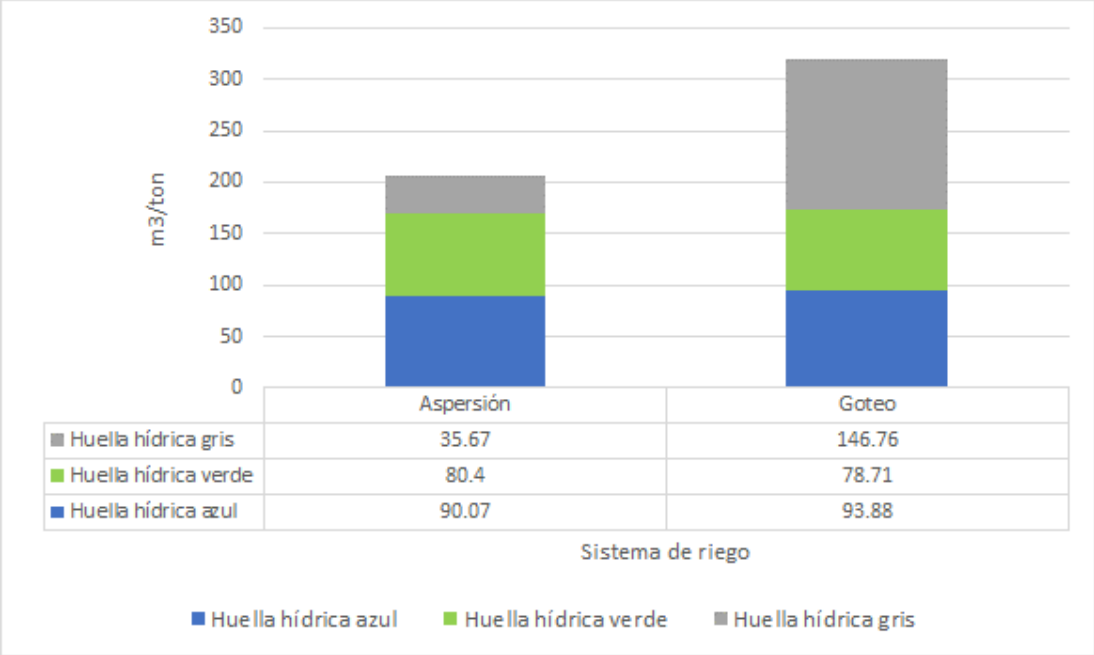


Figura 2. Resultados de la HH para el sistema de riego por aspersión y riego por goteo.

En la actualidad son escasas las investigaciones en Colombia sobre los impactos producidos por el cambio climático en la disponibilidad de agua, aunque se reconoce el riesgo que esto representa, con un constante aumento de la población que conllevan presiones por uso, reflejándose en alteraciones de las condiciones naturales y afectaciones de la calidad del recurso hídrico (Arévalo et al., 2011). La mejora de la tasa de utilización de agua verde o la reducción del uso de agua azul en la planificación de la estructura de plantación de cultivos puede ahorrar agua de riego sin reducir el rendimiento de los cultivos (Su et al., 2014), lo que tiene un significado vital para la seguridad alimentaria y el desarrollo sostenible de regiones áridas y semiáridas**.** (F. Zhang et al., 2021)

Conclusiones.

El resultado de la huella hídrica total para el sistema de producción de cebolla de bulbo en el municipio de Samacá fue de 206.14 $m^3.t^{-1}$ para riego por aspersión con un rendimiento de 47.05 t. ha^{-1} y de 319.35 $m^3.t^{-1}$ para riego por goteo con un rendimiento de 48.6 t. ha^{-1}. El calculó de la huella hídrica por componente obtuvo valores para este ciclo del cultivo de cebolla de bulbo en riego por aspersión de 90.07 $m^3.t^{-1}$ HH azul, 80.40 $m^3.t^{-1}$ de huella verde y de HH gris de 35.67 $m^3.t^{-1}$. Mientras que en riego por goteo los valores para huella hídrica por componente fueron HH azul 93.88 $m^3.t^{-1}$, HH verde 78.71 $m^3.t^{-1}$ y HHgris de146.76 $m^3.t^{-1}$

Los resultados relacionados con la HH gris en el riego por goteo fueron los que más contribuyeron al incremento de la huella hídrica total con un valor de 146.76 $m^3.t^{-1}$, mientras que en el riego por aspersión fue de 35.67 $m^3.t^{-1}$.
El rendimiento promedio estimado para el 2018 según información del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural fue de 22.68 t. ha^{-1} es bajo comparado con los determinados en la investigación ya que para el sistema de riego por goteo fue de 48.6 $t.ha^{-1}$ y para riego por aspersión 47.05 $t.ha^{-1}$.

Agradecimiento
Este trabajo contó con la financiación del Sistema General de Regalías, y hace parte de los resultados del proyecto de investigación: "Desarrollo de una estrategia de adaptación que conduzca a reducir la vulnerabilidad de los sistemas agrícolas al cambio climático en algunos municipios de la zona centro del departamento de Boyacá". Identificado con código BPIN: 2018000100046.

Literatura citada

Agronet, & Minagricultura. (2022). Reporte:Área, Producción, Rendimiento y Participación Municipal en el Departamento por Cultivo.

Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo. In ESTUDIO FAO RIEGO Y DRENAJE.

Arévalo, D., Lozano, J., & Sabogal, J. (2011). Estudio nacional de huella hídrica Colombia, Sector Agricola. Revista Internacional de Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo, 6(1988–0928).

Chapagain, A. K., & Hoekstra, A. Y. (2011). The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives. Ecological Economics, 70(4), 749–758. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.11.012

Díaz Fonseca, O. D., Lizarazo Ariza, J. A., & Torres Ortega, J. A. (2016). Determinación De la Huella HíDrica Del algodón. Pblicaciones e Investigación. Revista Especializada En Ingeniería, 10(1900–6608).

Franke, N. A., Boyacioglu, H., & Hoekstra, A. Y. (2013). Grey Water Footprint Accounting: Tier 1 Supporting Guidelines, Value of Water Research Report Series No. 65. In UNESCO-IHE Institute for Water Education (Issue November).

Gao, J., Xie, P., Zhuo, L., Shang, K., Ji, X., & Wu, P. (2021). Water footprints of irrigated crop production and meteorological driving factors at multiple temporal scales. Agricultural Water Management, 255, 107014. https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2021.107014

Higuera, C., & Jaimes, O. (2019). Evaluación de indicadores de huella hídrica en la producción de un cultivo de cebolla de bulbo y papa en los municipios de Duitama y Samaca Boyacá.

Hoekstra, A. (2017). Water Footprint Assessment: Evolvement of a New Research Field. Water Resources Management, 31(10), 3061–3081. https://doi.org/10.1007/s11269-017-1618-5

Hoekstra, A., Chapagain, A., Aldaya, M., & Mekonnen, M. (2011). The Water Footprint Assessment Manual. Setting the Global Standard. In Social and Environmental Accountability Journal (Vol. 31, Issue 2). Earthscan. https://doi.org/10.1080/0969160x.2011.593864

IDEAM. (2015). Estudio Nacional del Agua 2014. In Estudio Nacional del Agua 2014.

IDEAM. (2019). Estudio nacional del agua.

Léllis, B. C., Martínez-Romero, A., Schwartz, R. C., Pardo, J. J., Tarjuelo, J. M., & Domínguez, A. (2022). Effect of the optimized regulated deficit irrigation methodology on water use in garlic. Agricultural Water Management, 260. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107280

Medina, E., Mancilla Villa, O., Larios, M., Guevara, R., Olguín, J., & Barreto García, O. (2016). Calidad del agua para riego y suelos agrícolas en Tuxcacuesco , Jalisco. IDESIA (Chile), 34(6), 51–60. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292016005000035

Novoa, V., Ahumada-rudolph, R., Rojas, O., Sáez, K., De, F., & Luis, J. (2019). Science of the Total Environment Understanding agricultural water footprint variability to improve water management in Chile. Science of the Total Environment, 670, 188–199. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.127

ONU. (2014). Un Objetivo Global para el Agua Post-2015: Síntesiss de la principales Conclusiones y Recomendaciones de ONU-Agua. Un Water, Global Objetive, 10.

Pérez Ortolá, M., & Knox, J. W. (2015). Water relations and irrigation requirements of onion (allium cepa l.): a review of yield and quality impacts. Experimental Agriculture, 51(2), 210–231. https://doi.org/10.1017/S0014479714000234

Reveles, M., Cid Ríos, Á., Velásquez Valle, R., & Trejo Calzada, R. (2013). Crecimiento, rendimiento y calidad de cebolla en dos densidades de plantación en calera, zacatecas, México. Agrofaz, 13(3), 85–92.

Romero, M., Quintero, M., & Monserrate, F. (2016a). Elementos Técnicos para la Medición de Huella Hídrica en Sistemas Agrícolas.

Romero, Quintero, & Monserrate. (2016b). Elementos Técnicos para la Medición de Huella Hídrica en Sistemas Agrícolas.

Uribe, D., Lozano, J., & Martínez, J. (2012). Una mirada a la agricultura de Colombia desde su Huella Hídrica. WWF Reporte Colombia, 67.

Zhang, F., Cai, Y., Tan, Q., & Wang, X. (2021). Spatial water footprint optimization of crop planting: A fuzzy multiobjective optimal approach based on MOD16 evapotranspiration products. Agricultural Water Management, 256, 107096. https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2021.107096

Zhang, Y., Huang, K., Yu, Y., Hu, T., & Wei, J. (2015). Impact of climate change and drought regime on water footprint of crop production: the case of Lake Dianchi Basin, China. Natural Hazards, 79(1), 549–566. https://doi.org/10.1007/s11069-015-1862-z

65° CONGRESO INTERNACIONAL
Agua, Saneamiento, Ambiente y Energías Renovables
Bogotá - Colombia
Centro de Convenciones Ágora
Julio 13, 14 y 15 de 2022

Evaluación del Rendimiento de un Cultivo de Microalgas para Tratamiento de Agua Residual Institucional

D.E. Sarmiento[1], D.S. Herrera[1], G.A. Baquero[1*]

[1] Semillero de investigación 'Recursos Hidráulicos y Energéticos'. Programa de Ingeniería Ambiental, UniversidadMilitar Nueva Granada, Cajicá (Colombia).

*Autor corresponsal: Programa de Ingeniería Ambiental, Universidad Militar Nueva Granada, Km2 Vía Cajicá -Zipaquirá. Cajicá. Código Postal 250240. Colombia. Email: gustavo.baquero@unimilitar.edu.co

Abstract

The main objective of this research is to assess the treatability of institutional wastewater, using microalgae, under environmental conditions of high altitude locations, in the tropical equatorial zone (Sabana de Bogotá, Colombia 2600 masl, 0.76 Atm, average air temperature 16o C). A microalgae culture was developed as a consortium, starting from a polishing pond sample, several alternatives have been evaluated aiming to increase the microalgae biomass, includingwastewater and dehydrated chicken broth, as substrate. A microalgae culture was developed as a consortium, starting from a polishing lagoon sample, several alternatives have been evaluated aiming to increase the microalgae biomass, including wastewater and dehydrated chicken broth as substrate. The original microalgae culture was used in wastewater treatment tests, considering different Microalgae:Wastewater ratios. In order to evaluate microalgae biomass production and removal efficiencies, multiple process variables have been monitored along with treatment processes. All tests were conducted within a 24-day period, in pilot-scale, air-mixed, batch-operated reactors. According to the results obtained, under the conditions evaluated it is feasible to remove BOD_5 (40%) and Nitrogen from wastewater (80%), while an increase in the biomass of microalgae is evidenced. The most representative microalgal genera identified during the tests were Pediastrum sp., Desmodesmus sp., Scenedesmus sp., Coelastrum sp., Chlorella sp. Future work on this subject should be oriented towards the implementation of continuous treatment processes, supported by mathematical modeling of biological and physical processes.

KeyWords: Consortia, Microalgae, Remotion,Treatment,Wastewater

ACODAL
ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
65° CONGRESO INTERNACIONAL
Agua, Saneamiento, Ambiente y Energías Renovables
Bogotá - Colombia
Centro de Convenciones Ágora
Julio 13, 14 y 15 de 2022

Evaluación del Rendimiento de un Cultivo de Microalgas para Tratamiento de Agua Residual Institucional

Resumen

El objetivo de la presente investigación es evaluar la tratabilidad de agua residual institucional, usando microalgas, en las condiciones ambientales de la Sabana de Bogotá, Colombia (2600 msnm, 0.76 Atmósferas, temperatura ambiente promedio 16o C). Un cultivo de microalgas se desarrolló como un consorcio, a partir de una muestra recolectada en una laguna de pulimiento, se evaluaron diferentes estrategias para aumentar la biomasa del consorcio de microalgas utilizando como sustrato agua residual, así como caldo de gallina deshidratado. A partir del cultivo inicial se adelantaron pruebas para el tratamiento de agua en diferentes relaciones Microalgas:Agua Residual. Diferentes variables de proceso fueron monitoreadas durante el tratamiento de agua con el fin de evaluar el rendimiento de la producción de biomasa (microalgas) y las eficiencias de remoción durante el tratamiento. Las pruebas se adelantaron durante 24 días en reactores a escala piloto, mezclados con aire, operados por lotes. Los resultados obtenidos muestran que en las condiciones evaluadas es viable remover DBO_5 (40%) y Nitrógeno del agua residual (80%), a la vez que se evidencia un incremento en la biomasa de microalgas. Los géneros de microalgas más representativos identificados durante las pruebas fueron Pediastrum sp., Desmodesmus sp., Scenedesmus sp., Coelastrum sp.,Chlorella sp. El trabajo futuro en esta temática está orientado a la implementación de procesos continuos, soportados en modelación matemática de los procesos biológicos y físicos.

Palabras clave: Agua residual, Consorcio, Microalgas, Remoción, Tratamiento

Introducción

De acuerdo con el Banco Mundial (2020), el 80% de las aguas residuales del mundo son vertidas sin un tratamiento adecuado al medio ambiente; no obstante, el agua residual y su contenido resultan ser recursos que pueden valorizarse por medio de las instalaciones para la recuperación de recursos del agua. El tratamiento de agua residual, además de eliminar la contaminación presente en el agua, beneficia al medio ambiente, la conservación de los recursos naturales y la salud pública. La descarga de agua residual sin tratamiento, a cuerpos de aguas superficiales representa un vector de enfermedades y en consecuencia afecta la calidad de vida.

El uso de microalgas como medio biológico de remediación hace parte de las tecnologías que contribuyen efectivamente con la eliminación de contaminantes en el agua. Su uso en el tratamiento de agua residual es aplicado en todo el mundo, sin embargo, aún hace falta investigación para avanzar en el entendimiento detallado del proceso y así poder afrontar retos existentes en la aplicación de microalgas para el tratamiento biológico de agua residual (Alam y Wang, 2019). Si bien, en el estado actual de conocimiento el potencial de estudio aun es enorme, en las últimas dos décadas (2000-2020) han existido avances significativos en la materia, a partir de lo anterior se ha confirmado que las microalgas se pueden emplear en el tratamiento de diferentes tipos de desechos líquidos, por ejemplo, los agroindustriales, efluentes de fábricas de procesamiento de alimentos, aguas residuales domésticas y efluentes de desechos animales (Abdel-Raouf *et al*., 2012).

Comparado con los procesos convencionales, el uso de microalgas en el tratamiento de agua residual presenta diferentes ventajas no solo porque remueve eficientemente materia orgánica y nutrientes sin gastos considerables de energía, sino también porque representa una fuente de secuestro de carbono, relevante para disminuir la huella de carbono de los procesos en un escenario de cambio climático. Adicionalmente, tiene una ventaja importante relacionada con la biomasa que puede ser utilizada como materia prima para la producción de bienes, es decir que además de representar un proceso efectivo a favor de la remoción de contaminantes en el agua se pueden generar subproductos de valor agregado como biogás, biodiesel y bioplástico entre otros (Alam y Wang, 2019; Gupta y Bux, 2019). El cultivo de microalgas ha sido estudiado durante varios años para desarrollar un sistema de cultivo rentable y eficiente para la producción a gran escala (Apel *et al*., 2017), además representa una alternativa sostenible y eficiente en carbono para la producción de biocombustibles.

El requerimiento energético en el tratamiento de aguas residuales en procesos convencionales es de 0.5 kWh/m^3, mientras que para sistemas basados en microalgas, se requieren 0.2 kWh/m^3, lo anterior representa una disminución superior al 50% en el consumo de la energía. Adicionalmente, a partir de las características promedio de nutrientes en el agua residual doméstica (alrededor de 40 mg/L de Nitrógeno total Kjeldahl y 8 mg/L de Fósforo Total) se estima una producción de 0.6 g/L con un potencial de producción de biomasa equivalente a 77.6 millones de kg al día en los Estados Unidos (Christenson y Sims, 2011).

Para llevar a cabo un cultivo de microalgas aplicado al tratamiento de agua se pueden implementar sistemas abiertos y cerrados. Los sistemas abiertos proveen una alternativa costo-efectiva para el tratamiento de agua cuando existe espacio disponible; requieren poco mantenimiento y son de fácil operación. No obstante, presenta varias desventajas, entre ellas, el alto riesgo de contaminación del cultivo, la dependencia del clima de la zona donde se desarrolle, pérdidas de agua por evaporación y la ocupación de grandes extensiones de tierra. Los sistemas abiertos son los más usados para la producción de biomasa a gran escala y pueden desarrollarse en estanques poco profundos, tanques, estanques circulares y reactores tipo carrusel, siendo este último el más usado (Gupta y Bux, 2019).

Por otro lado, para llevar a cabo un sistema de microalgas cerrado se usa un fotobiorreactor, (recipiente de cultivo cerrado e iluminado) diseñado para controlar la producción de biomasa mediante el seguimiento y control de los parámetros operativos. En este cultivo se mantienen condiciones controladas de pH, temperatura del agua, luz y dióxido de carbono con el fin de optimizar el crecimiento de las células (Znad, 2020). Existen diferentes configuraciones de fotobiorreactores que pueden ser usados de acuerdo con la disponibilidad de recursos, cada uno con ventajas y desventajas. Hacen parte de esta clasificación los fotobiorreactores de columna vertical (que favorece la mezcla y la entrada de luz), los fotobiorreactores tubulares (favorecen entrada de luz y alta producción de biomasa) y los fotobiorreactores de panel (priorizan la entrada de luz). Para cada uno de ellos, es imprescindible seguir diferentes criterios de diseño orientados a maximizar la dispersión de la luz, garantizar la agitación, mantener el balance de dióxido de carbono/oxígeno, controlar la temperatura del agua, y el pH (Alam y Wang, 2019).

Dado que la luz es imprescindible para el desarrollo de las microalgas, su dispersión es un factor importante en el cultivo, si hay suficiente luz las algas desarrollan procesos fotosintéticos mientras que si se generan regiones de oscuridad se generan procesos de respiración. El nivel óptimo de intensidad lumínica es de 26−400 µmol photons $m^{-2} s^{-1}$ (Maltsev *et al*., 2021), mientras que el ciclo temporal de luz-oscuridad mínimo recomendado es de 16:8. Por otro lado, la agitación, es un factor importante dado que permite una distribución uniforme de nutrientes, evita la estratificación térmica, mejora la transferencia de masa gas-líquido y mantiene las células de algas en suspensión, en este caso puede usarse agitador mecánico o procesos de aireación (Gupta y Bux, 2019; Kim, 2015).

El dióxido de carbono (CO_2), por su parte, es importante para la fotosíntesis; la alimentación de CO_2 mediante difusión permite que este gas se disuelva en el agua, formando ácido carbónico que utilizan las microalgas durante la fotosíntesis. Este gas juega un papel importante para el control del pH y es una de las variables más significativas en tanto un bajo coeficiente de transferencia de masa, de la fase gaseosa al estado líquido, es la principal limitación de la transferencia de CO_2.

Finalmente, la temperatura y el pH representan variables importantes para el rendimiento del cultivo, por un lado, la temperatura influye en las actividades metabólicas, las actividades enzimáticas y la conformación de estructuras vitales (Valores óptimos de 18 a 24 °C), mientras que el pH afecta el cultivo de microalgas con respecto a la disponibilidad y asimilación de los nutrientes disueltos en el medio; cada especie de microalgas tiene rangos óptimos de pH, el rango óptimo general es de 8.2-8.7 (Alam y Wang, 2019; Kim, 2015). Por ejemplo, con *Chlorella Vulgaris*, se ha registrado crecimiento tanto en condiciones de pH ácidas (3 a 6.2) como en condiciones de pH alcalinas (8.3 a 9) con pH óptimo de 7.5 a 8, mientras tanto, con *Dunaliella salina* el máximo crecimiento se registró en pH alcalino de 9.18 (Gatamaneni *et al*., 2018).

Existe evidencia del potencial de las microalgas para la biorremediación de agua y producción simultánea de biomasa cuando se hacen controles de las condiciones de cultivo, no obstante, en las condiciones ambientales de la Sabana de Bogotá (2600 msnm, 0.76 Atmósferas, temperatura ambiente promedio 16º C) no existen avances significativos en la aplicación de estos procesos; a nivel Colombia, las publicaciones relacionadas al tratamiento de agua residual no superan los 25 documentos por año, durante los últimos los últimos cinco años (consulta adelantada en SCOPUS). A partir de la revisión de literatura adelantada, en la Sabana de Bogotá no se han identificado aplicaciones de microalgas para el tratamiento de agua residual, por lo anterior resulta relevante avanzar en el estudio de esta materia y en particular en su potencial en la aplicación para el tratamiento biológico de agua residual, en las condiciones ambientales locales de la Sabana de Bogotá.

Materiales y Métodos

Inicialmente se recolectó una muestra de agua de una laguna que funciona como pulimiento de un proceso biológico para el tratamiento de agua residual de una institución de educación superior. Con la muestra recolectada se inició el cultivo de microalgas, posteriormente este cultivo sirvió como inóculo para diferentes escenarios orientados a la evaluación del rendimiento del tratamiento de agua residual institucional con microalgas. A continuación, se presentan los detalles de la metodología adoptada en esta investigación.

Recolección y cultivo inicial de las microalgas

Una muestra de agua fue tomada de una laguna de pulimiento, que recibe el efluente de un proceso de lodos activados convencional que trata agua residual de una institución de educación superior. Asumiendo la presencia de microalgas en la muestra de agua se inició su cultivo. El cultivo inició con una muestra de 1.5 L proveniente del lago, dicha muestra fue colocada en un recipiente plástico transparente. Semanalmente se adicionaron 1.5 g de caldo de gallina deshidratado (marca comercial Maggi) y se mantuvo aireación (2 L/min) durante 2 meses. Este cultivo estuvo expuesto a luz natural en las condiciones ambientales de la sabana de Bogotá (2600 msnm. 0.76 Atmósferas. Temperatura ambiente promedio 16° C). Cabe aclarar que este cultivo se realizó como un consorcio de microalgas.

Evaluación del rendimiento de las microalgas para el tratamiento de agua

Tres escenarios diferentes fueron evaluados simultáneamente, en cada caso se usaron combinaciones de diferentes volúmenes de agua residual, inóculo del cultivo de microalgas y agua limpia (como blanco). El detalle de cada escenario evaluado se presenta en la Tabla 1. La duración de estas pruebas es de 24 días. Los cultivos se desarrollaron en botellas plásticas, transparentes con capacidad de 5 L, cada cultivo tenía un volumen líquido inicial de 2 L, en cada caso, con el fin de agitar el cultivo se mantuvo aireación permanente (3 L/min). Los cultivos estuvieron expuestos a luz natural, sin exposición directa al sol, con variaciones día - noche (fotoperiodo 12 horas).

Tabla 1. Escenarios evaluados para el tratamiento de agua residual.

Escenario	Agua residual (Volumen)	Cultivo microalgas (Volumen)	Agua limpia (Volumen)
1	75 %	25 %	---
2	25 %	75 %	---
3	---	10 %	90 %

*Nota: *Se agregaron 2 g de medio de cultivo (caldo de gallina deshidratado) al inicio de las pruebas*

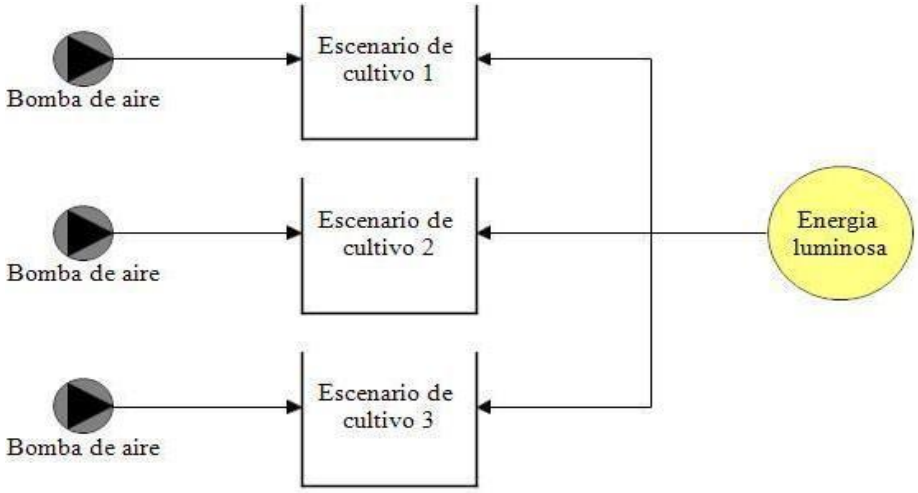


Figura 1. Configuración escenarios usados en el cultivo de microalgas.

El seguimiento a los escenarios evaluados para el tratamiento de agua se desarrolló a partir de mediciones de absorbancia (espectrofotómetro Pharo 100, longitud de onda 665 nm, volumen de muestra 3 mL), pH (multiparámetro Hanna HI98194, volumen de muestra 100 mL) y turbiedad (turbidímetro Hanna HI 98703, volumen de muestra 20 mL). En todos los casos, antes de la medición, las muestras se agitaron con el fin de evitar sedimentación de las microalgas.

Características del agua residual

La muestra de agua residual (8 L) fue tomada en el efluente del pretratamiento de la Planta de Tratamiento de Agua Residual de la Universidad Militar Nueva Granada (Cajicá, Colombia). Los resultados de su caracterización se presentan en la Tabla 2. La caracterización del agua se adelantó usando la siguiente instrumentación: Nitrógeno (Controlador CM442 y Sensor ISEmax CAS40D Endress+Hauser), DBO_5 (Equipo Oxitop WTW), pH, oxígeno disuelto, conductividad (Multiparámetro Hanna HI98194).

Tabla 2. Caracterización del agua residual

Parámetro	Valor	Unidad
DBO_5	140	mg/L
Amonio	53.31	mg/L
Nitrato	3.91	mg/L
Oxígeno disuelto	0.55	mg/L
pH	8.3	--------
Temperatura	19.5	°C
Conductividad	50.83	µS/cm

Identificación de microalgas

Para el cultivo inicial de microalgas, así como para los escenarios evaluados se tomaron muestras de 30 mL que fueron analizadas en microscopio con los objetivos 40x y 100x. En cada observación se utilizó una muestra homogeneizada con el fin de garantizar la representatividad de la observación. La identificación de las microalgas se adelantó tomando como referencia los trabajos de Nuñez (2008) y Van Vuuren *et al* (2006).

Resultados y Discusión

Identificación de microalgas

La identificación de las microalgas (Figura 2) se realizó a nivel morfológico a partir de la observación de las características de los microorganismos, principalmente cantidad, forma y tamaño de las células siguiendo la guía de identificación de Nuñez (2008). Dado que no se realizaron pruebas de identificación molecular utilizando secuencias de ADN, no se conoce con certeza cada una de las especies presentes en el cultivo, a partir de la caracterización morfológica la identificación se hace de acuerdo con la categoría taxonómica de género.

En la Figura 2 se presentan fotografías de las microalgas más comunes identificadas en el cultivo anteriormente descrito. Las imágenes numeradas como 1 y 2 corresponden a especies de microalgas del género *Pediastrum*, caracterizadas por ser poligonales y poseer dos tipos de células, las exteriores con proyecciones que se orientan fuera del cuerpo celular y las interiores, que carecen de proyecciones, en ocasiones con incisiones. A partir de la imagen numerada como 3 (Figura 2), se identificó como una microalga del género *Desmodesmus,* dado que la forma de sus células son elipsoides, formando cenobios de 2 o 4 más células de lado a lado, adicionalmente en este género, presentan proyecciones en las células extremas como se denota en la imagen (Nuñez, 2008).

En las imágenes numeradas como 4, 5 y 6 (Figura 2), las microalgas se clasificaron como pertenecientes al género *Scenedesmus*, especialmente por la forma de las células que pueden ser elipsoides, lunadas u ovoides con cenobios planos formados por 2, 4, 8, 16 o 32 células. Como se denota en la imagen, la descripción se ajusta a la observación en cuanto a la forma y número de células, por lo cual se considera de este género. Mientras tanto, la imagen numerada como 7 (Figura 2), fue clasificada como *Coelastrum,* lo anterior debido a que las células están estrechamente asociadas y su forma esférica es característica de este género (Nuñez, 2008; Van Vuuren *et al*., 2006).

En la imagen numerada como 8 (Figura 2) la microalga se clasificó como perteneciente al género *Chlorella*, que se caracteriza por la forma circular y una única célula que se ajusta a la imagen, adicionalmente el tamaño (10 µm) se encuentra dentro del rango para las especies pertenecientes a este género. Mientras tanto, en la imagen 9 de la Figura 2, la microalga se identificó como *Closterium,* por su forma alargada y de medialuna con extremos puntiagudos, además la pared celular transparente es también indicio de que se trata de una especie perteneciente a este género (Van Vuuren *et al*., 2006).

Rendimiento del cultivo de las microalgas en el tratamiento de agua

La Figura 3 describe el aumento de la biomasa de las microalgas en el cultivo, lo anterior a partir de la medida de la absorbancia, que es proporcional a la concentración de microalgas. El comportamiento de la concentración de las microalgas en los escenarios propuestos está basado en los datos experimentales obtenidos a una longitud de onda de 665 nm, que es la asociada a la absorbancia de la Clorofila A en las células vivas, en este caso microalgas. Las microalgas fueron recolectadas de una fuente que recibía el efluente del proceso biológico, su cultivo se adelantó con el agua residual afluente al mismo proceso de tratamiento. Al inicio del cultivo, durante los días 1 a 6 se presenta un periodo de adaptación de las microalgas a la mezcla con agua residual cruda (escenarios 1 y 2), una vez superada la fase de adaptación la tasa de producción de biomasa aumenta. La fase de latencia no se identifica por lo que se asume que las microalgas introducidas en estos escenarios estaban en etapa de crecimiento exponencial y el hecho de colocarlas en un medio de cultivo similar al de la fuente de la que fueron obtenidas permitió que su fácil adaptación (Vacca *et al*., 2017). Por último, la etapa estacionaria no se observa al cabo de los 24 días de estudio.

Los escenarios 1 y 2 (Figura 3 y Tabla 1) parten desde un valor diferente de concentración en el día 1. Es posible observar un crecimiento exponencial más rápido en el escenario con 75% de agua residual (mayor variación de absorbancia con respecto al tiempo), superando alrededor del día 18 la tendencia de crecimiento del escenario con 25% de agua residual. La disponibilidad de nutrientes en el escenario 2 (25% agua residual) es menor que en el escenario 1 (75% agua residual) por lo que la competitividad por el alimento por parte de las microalgas es mayor pero no un limitante para su producción. Sin embargo, al tener el escenario 1 (75% agua residual) mayor disponibilidad de nutrientes se proporciona un ambiente libre de competencia en la etapa de crecimiento exponencial y garantiza una mayor producción de microalgas. Adicionalmente vale la pena resaltar que en este escenario se usó un mayor volumen de agua residual institucional por lo que en este tipo de configuración el agua tratada será mayor en comparación con la tratada en el escenario con 25% de agua residual.

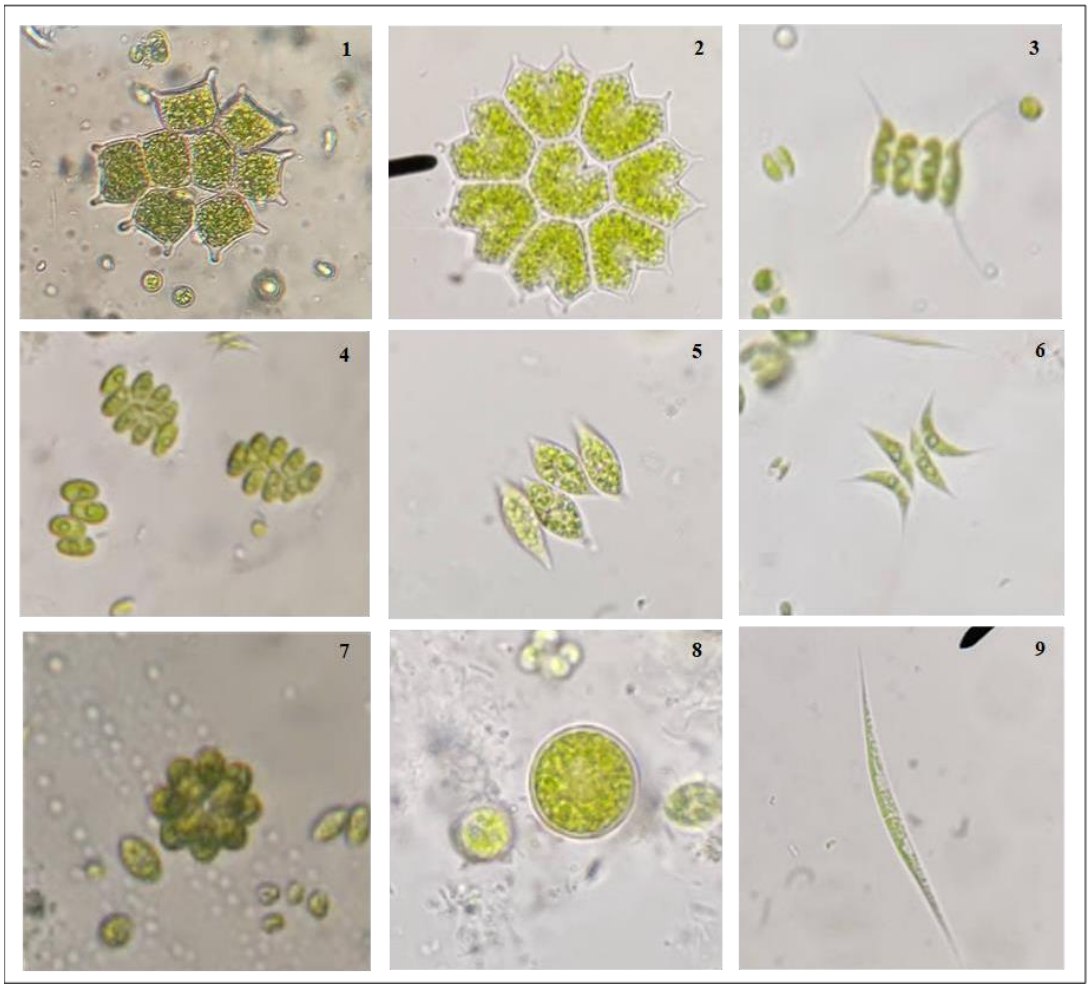


Figura 2. Géneros de microalgas más representativos identificados por comparación en el desarrollo de la presente investigación (Especies no confirmadas por ADN). 1-2 *Pediastrum* sp., 3. *Desmodesmus* sp., 4-5-6 *Scenedesmus* sp.,7. *Coelastrum* sp., 8. *Chlorella* sp., 9. *Closterium* sp.

En el escenario 3 (microalgas + agua limpia) se obtiene una curva de crecimiento menor a la obtenida en los otros escenarios, esta es una menor variación de absorbancia por unidad de tiempo. La disponibilidad de nutrientes proporcionada por el caldo de gallina deshidratado permite un aumento en la concentración de microalgas sin embargo su tasa de crecimiento (pendiente m) es menor a la registrada en los escenarios alimentados con agua residual institucional. El caldo de gallina deshidratado, aunque garantiza el aumento de biomasa por más de 24 días, presenta una tasa de crecimiento menor a la observada en los escenarios alimentados con agua residual.

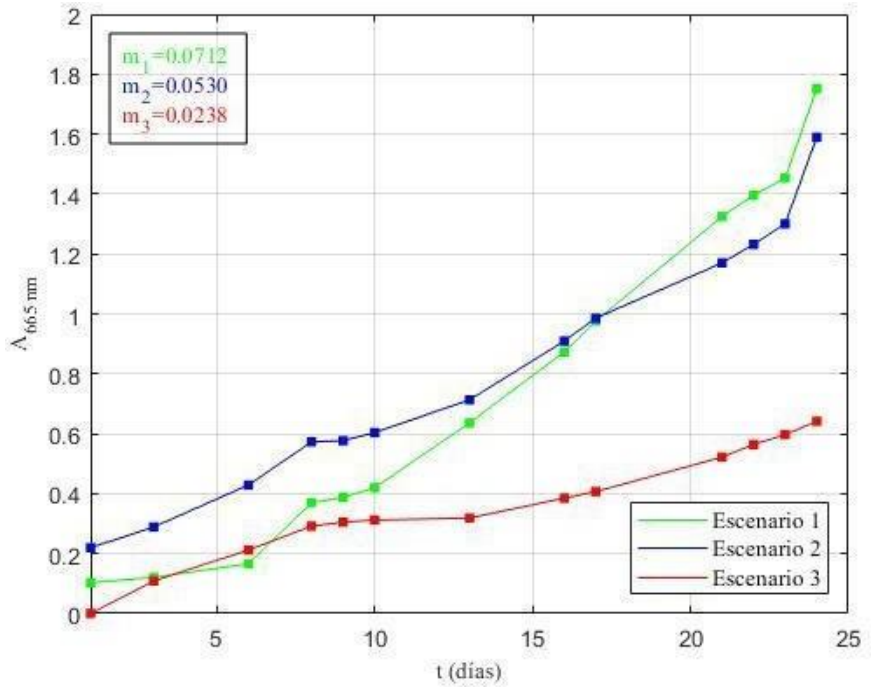


Figura 3. Absorbancia (665 nm) en función del tiempo para la medición de clorofila A en el escenario 1 (75% Aguaresidual), escenario 2 (25% Agua Residual) y escenario 3 (10% Caldo deshidratado)

La Figura 4 describe las variaciones de pH durante el periodo de estudio. El rango de pH recomendado para el cultivo de microalgas se encuentra entre 8.2 a 8.7 (Kim, 2015). En todos los escenarios evaluados se registró un incremento en el nivel pH. El dióxido de carbono disuelto en el líquido influencia el nivel de pH. Un aumento de este parámetro está asociado con el crecimiento de microalgas y el consumo de carbono durante la fotosíntesis, por lo anterior, el CO_2 estará menos presente en el cultivo y el pH aumentará. El aumento de pH puede considerarse una señal de bienestar para el cultivo de microalgas mientras que la disminución del pH se asocia con la disminución de la actividad fotosintética (Qiu *et al*., 2017; Beltrán-Rocha *et al*., 2021). Los resultados que se presentan en la Figura 4 corresponden a un cultivo por lotes, el comportamiento del pH en un cultivo continuo, como puede ser en la práctica del tratamiento de agua residual, deberá ser validado y en caso de ser necesario deberán considerarse ajustes al pH durante la operación.

La turbiedad fue monitoreada durante los primeros 17 días de las pruebas (Figura 5), en este caso observa una tendencia al aumento general desde su inicio hasta el fin del registro. En el escenario con mayor proporción de agua residual (escenario 1) se presenta un ligero decrecimiento en los valores de turbiedad, esta fase de adaptación resulta como consecuencia de las relaciones Microalgas:Agua Residual, para los casos evaluados el menor valor se presenta en el escenario 1. Los resultados obtenidos muestran que la concentración de sólidos suspendidos, entendidos como biomasa de mircroalgas, tiene un comportamiento ascendente, consistente con el obtenido en las mediciones de absorbancia; con esto se confirma que este método permite hacer seguimiento a la concentración de microalgas (Acebo y Hernández, 2013). El tratamiento de agua residual se desarrolló a partir de un consorcio de microalgas previamente familiarizadas con las características del efluente de la planta de tratamiento. Esta estrategia de aclimatación a las características del agua residual resulta ser un procedimiento válido para establecer un cultivo de microalgas para el tratamiento de agua residual

Las condiciones limitantes para un cultivo de microalgas son el tiempo, la intensidad de la luz y el suministro de CO_2 (Alam y Wang, 2019). En los escenarios evaluados la energía luminosa no fue monitoreada ni controlada, estas no son las condiciones óptimas para un cultivo de microalgas considerando que el rendimiento de la producción de biomasa de microalgas a menudo está limitado por la energía luminosa suministrada y la concentración de células. Sin embargo, un uso eficiente de la energía solar puede resolver simultáneamente los problemas de un alto costo operativo, consumo de electricidad y contaminación ambiental (Chen *et al*., 2011). Las condiciones en las que se desarrollaron las pruebas no son las condiciones recomendadas si se quiere obtener un crecimiento rápido, en todo caso son condiciones similares a las que se podría desarrollar un cultivo de microalgas, de bajo impacto, para el tratamiento de agua residual.

.

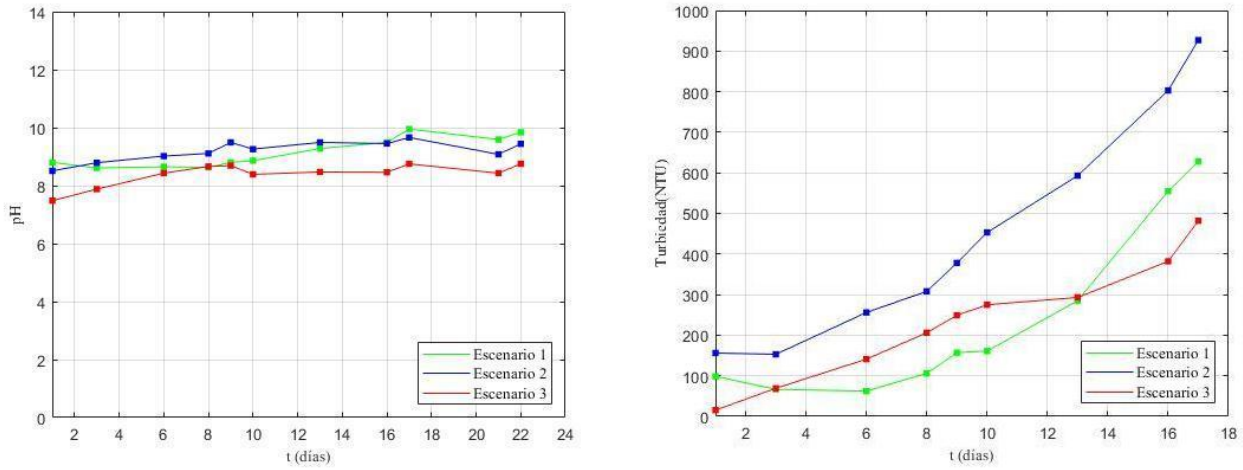


Figura 4 y 5. Variación del pH (izquierda) y Turbiedad (derecha) en función del tiempo en el escenario 1 (75%Agua residual), escenario 2 (25% Agua Residual) y escenario 3 (10% Caldo deshidratado)

Remoción de Contaminantes

En la Tabla 3 se presenta la eficiencia de remoción de nitrógeno y DBO_5 en los escenarios que contenían agua residual institucional. La eficiencia de remoción de nitrógeno y DBO_5 en calculó con la ecuación 1. En el caso del nitrógeno, la remoción fue mayor en el escenario de alta concentración de microalgas (escenario 2), dado que este es una fuente de nutrientes para las microalgas se usa en mayor proporción que en escenarios con menor concentración de microalgas. Se analizó la suma del nitrógeno amoniacal más el nitrato; no se cuantificó la concentración de nitritos asumiendo que es un estado intermedio de la nitrificación. Los resultados muestran la oxidación de una pequeña cantidad de nitrógeno (incremento en el valor de nitratos) y una remoción global de nitrógeno (disminución de la cantidad total de nitrógeno contabilizada). Consecuente con lo anterior el nitrógeno ha sido utilizado por las microalgas para la producción de biomasa, lo cual se corrobora en literatura donde se reporta que si bien las microalgas son capaces de asimilar nitrógeno de una variedad de fuentes de nitrógeno que incluyen amonio, nitrato, nitrito y urea, el amonio es la fuente de nitrógeno preferida dado que es la fuente de nutriente energéticamente más eficiente, debido a que se requiere menos energía para su absorción (Delgadillo-Mirquez *et al*., 2016).

Tabla 3. Concentración de nitrógeno y DBO_5 en el afluente y efluente

Parámetro	Concentración de entrada (mg/L)	Concentración de salida (mg/L)		Remoción (%)	
		Escenario 1	Escenario 2	Escenario 1	Escenario 2
Amonio (NH_3-N)	53.31	12.46	4.43		
Nitrato (NO_3)	3.91	6.47	6.32		
Nitrógeno (Amonio+Nitrato)	57.22	18.93	10.75	66.9 %	81.2 %
DBO_5	140	84	82	40 %	41.4 %

$$Eficiencia\ de\ Remoción\ (\%) = \frac{Concentración\ inicial - Concentración\ final}{Concentración\ inicial} * 100 \qquad \textbf{Ecuación (1)}$$

Los resultados obtenidos muestran remociones de DBO_5. Cabe mencionar que en estas muestras no existió un proceso de separación de la biomasa por sedimentación, por lo anterior se asume que existe un aporte de DBO_5 proporcionado por las microalgas. Teniendo en cuenta lo anterior es necesario adelantar pruebas adicionales en los que se evalúe las tasas de sedimentación de las microalgas a la vez que se cuantifican las eficiencias de remoción en términos de compuestos solubles biodegradables.

Conclusiones

- El consorcio de microalgas puede ser usado para la remoción de DBO_5 y Nitrógeno del agua residual institucional con producción simultánea de biomasa.
- Las microalgas tomadas de la laguna de pulimiento que recibe el efluente del proceso de lodos activados se desarrollaban en condiciones similares a las simuladas en este trabajo, situación que facilitó el establecimiento del cultivo para tratamiento del agua.
- Dentro del trabajo futuro resulta necesario avanzar en pruebas de sedimentabilidad de las microalgas. Es necesario identificar los tiempos de residencia hidráulica, cargas hidráulicas y de sólidos en el sedimentador para lograr la separación de las microalgas del agua residual tratada.
- El caldo de gallina deshidratado es un medio de cultivo funcional de microalgas que no se había registrado anteriormente en literatura

Agradecimientos. *Producto derivado del proyecto de iniciación científica PIC-ING-3627 financiado por la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad Militar Nueva Granada - Vigencia 2022.*

Referencias Bibliográficas

Abdel-Raouf, N., Al-Homaidan, A. A., Ibraheem, I. B. M. (2012). Microalgae and wastewater treatment. *Saudi Journal of Biological Sciences*, **19**(3), 257–275. https://doi.org/10.1016/J.SJBS.2012.04.005

Acebo-González, D.. & Hernández-García, A. T. (2013). Los métodos turbidimétricos y sus aplicaciones en las ciencias de la vida. *Revista CENIC. Ciencias Biológicas*, 44(1), 001-017.

Alam, M. A., Wang, Z. (2019). Microalgae biotechnology for development of biofuel and wastewater treatment. In W. Z. Alam Asraful (Ed.), *Microalgae Biotechnology for Development of Biofuel and Wastewater Treatment*. Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2264-8

Apel, A. C., Pfaffinger, C. E., Basedahl, N., Mittwollen, N., Göbel, J., Sauter, J., Brück, T., & Weuster-Botz, D. (2017). Open thin-layer cascade reactors for saline microalgae production evaluated in a physically simulated Mediterranean summer climate. *Algal Research*, **25**, 381–390. https://doi.org/10.1016/J.ALGAL.2017.06.004

Banco Mundial. (2020, March 19). *El agua residual puede generar beneficios para la gente, el medioambiente y las economías,según el Banco Mundial*. https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2020/03/19/wastewater-a-resource-that-can-pay-dividends-for-people-the-environment-and-economies-says-world-bank

Beltrán-Rocha, J. C., Guajardo-Barbosa, C., Rodríguez-Fuentes, H., Reyna-Martínez, G. R., Osornio-Berthet, L., García- Martínez, M., Dagmar-Barceló Quintal, I., & López-Chuken, U. J. (2021). Some implications of natural increase of pH in microalgae cultivation and harvest by autoflocculation. Latin American Journal of Aquatic Research, **49**(5), 836–842. https://doi.org/10.3856/VOL49-ISSUE5-FULLTEXT-2691

Chen, C. Y., Yeh, K. L., Aisyah, R., Lee, D. J., & Chang, J. S. (2011). Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: A critical review. Bioresource Technology, **102**(1), 71–81. https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2010.06.159

Christenson, L., & Sims, R. (2011). Production and harvesting of microalgae for wastewater treatment, biofuels, and bioproducts. *Biotechnology Advances*, **29**(6), 686–702. https://doi.org/10.1016/J.BIOTECHADV.2011.05.015

Delgadillo-Mirquez, L., Lopes, F., Taidi, B., & Pareau, D. (2016). Nitrogen and phosphate removal from wastewater with a mixed microalgae and bacteria culture. *Biotechnology Reports*, *11*, 18–26. https://doi.org/10.1016/J.BTRE.2016.04.003

Gatamaneni, B. L., Orsat, V., & Lefsrud, M. (2018). Factors Affecting Growth of Various Microalgal Species. *Https://Home.Liebertpub.Com/Ees*, **35**(10), 1037–1048. https://doi.org/10.1089/EES.2017.0521

Kim, S. K. (2015). Handbook of Marine Microalgae: Biotechnology Advances. *In Handbook of Marine Microalgae: Biotechnology Advances*. Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/C2013-0-19117-9

Kumar Sanjay, Bux GuptaFaizal. (2019). Application of Microalgae in Wastewater Treatment. In *Application of Microalgae in Wastewater Treatment* (Vol. 2). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-13909-4

Maltsev, Y., Maltseva, K., Kulikovskiy, M., & Maltseva, S. (2021). Influence of Light Conditions on Microalgae Growth and Content of Lipids, Carotenoids, and Fatty Acid Composition. *Biology*, **10**(10). https://doi.org/10.3390/BIOLOGY10101060

Núñez-Avellaneda, M. (2008). Microalgas acuáticas: la otra escala de la biodiversidad en la Amazonia colombiana. Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas, SINCHI. Bogotá, Colombia.

Qiu, R., Gao, S., Lopez, P. A., & Ogden, K. L. (2017). Effects of pH on cell growth, lipid production and CO2 addition of microalgae Chlorella sorokiniana. *Algal Research*, ***28***, 192–199. https://doi.org/10.1016/J.ALGAL.2017.11.004

Vacca Jimeno, V. A., Angulo Mercado, E. R., Puentes Ballesteros, D. M., Torres Yépez, J. G., & Plaza Vega, M. E. (2017). Uso de la microalga Chlorella sp. viva en suspensión en la decoloración del agua residual de una empresa textil. Prospectiva, **15**(1), 93–99.https://doi.org/10.15665/RP.V15I1.829

Van Vuuren, S. J., Taylor, J., van Ginkel, C., & Gerber, A. (2006). Easy identification of the most common freshwater algae. A guide for the identification of microscopic algae in South African freshwatersBy Sanet Janse van Vuuren, Jonathan Taylor, Annelise Gerber and Carin van Ginkel (2006). *African Journal of Aquatic Science*, ***32***(3), 317–318. https://www.ajol.info/index.php/ajas/article/view/19770

Znad, H. (2020). Microalgae culture technology for carbon dioxide biomitigation. *Handbook of Algal Science, Technology and Medicine*, 303–316. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818305-2.00019-X

65° CONGRESO INTERNACIONAL
Agua, Saneamiento, Ambiente y Energías Renovables
ACODAL
ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
Bogotá - Colombia
Centro de Convenciones Ágora
Julio 13, 14 y 15 de 2022

Evaluación de cuatro tipos de biofertilizantes en hortalizas como una alternativa de las buenas prácticas agrícolas (BPA), con productores del municipio de Colón Putumayo Colombia

Evaluation of four types of biofertilizers in vegetables as an alternative to good agricultural practices (GAP), with producers from the municipality of Colón Putumayo Colombia.

Adriana Del Socorro Guerra Acosta[1*], Aura Elisa Gómez Perengues[2], Maira Alejandra Bastidas Bacca[3].

[1] Instituto Tecnológico del Putumayo, Sede Sibundoy Ampliación Colón.
[2, 3.] Instituto Tecnológico del Putumayo, Sibundoy Putumayo, Colombia. Tecnólogas en Saneamiento Ambiental.

**Autor corresponsal:* Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Instituto Tecnológico del Putumayo, municipio de Colón Putumayo, Calle 3 Kra 8- 9, Barrio El Centro País. Colombia. Email: aguerra@itp.edu.co - 3137272771.

Resumen

El recurso suelo está siendo afectado principalmente por prácticas de manejo inadecuadas, lo que ha generado una degradación acelerada del mismo, el uso irracional de agroquímicos constituye una de las causas de la elevada contaminación que sufre el ambiente en todo el planeta. Por esta razón, hoy se está estableciendo el redimensionamiento del empleo de las biotecnologías y entre ellas los biofertilizantes, con el objetivo de adaptarlas al desarrollo sustentable. En la investigación se evaluó cuatro tipos de biofertilizantes, pantotenato, caldo anaeróbico, supermagro y caldo de mantillo de bosque, en hortalizas como una alternativa de las buenas prácticas agrícolas (BPA), con productores del municipio de Colon Putumayo, para ello se realizaron encuestas que permitieron la obtención de información sobre el manejo de semillas, suelo, uso de fertilizantes, manejo agronómico y de subproductos, de igual manera se dictaron capacitaciones teórico- prácticas para la sensibilización de los productores sobre las ventajas de la aplicación de los abonos líquidos en las huertas y la elaboración de los mismos, para la respuesta a la aplicación se estableció un diseño de bloques irrestrictamente al azar con diferentes tratamientos, donde se evaluó el desarrollo de las plantas en el cultivo de lechuga (Lactuca sativa), las variables evaluadas fueron altura de planta cada 15 días, peso de planta en húmedo y materia seca, se realizó un análisis estadístico de varianza (Andeva) y una prueba de significancia de Tukey donde ($P < 0.05$), dando como resultado que hay diferencias significativas con el T2, siendo el mejor tratamiento para las variables altura, peso fresco y materia seca de la planta, en comparación con el testigo absoluto.

Palabras claves: Agroquímicos, biofertilizante, buenas prácticas agrícolas (BPA), huerta, suelo

Abstract

The soil resource has been affected mainly by inadequate management practices, which has generated an accelerated degradation of it, the irrational use of agrochemicals has become one of the causes of the planet's pollution. For this reason, the resizing of the use of biotechnologies and, among them, the biofertilizers, with the aim of adapting them to sustainable development, is now being imposed. In the present investigation, four types of biofertilizers were evaluated; pantetonato, anaerobic broth, supermagro and broth of forest mulch, in vegetables as an alternative of good agricultural practices (GAP), with producers of the Colon town (Putumayo), for this some surveys were conducted that allowed obtaining information on the management of seeds, soil, fertilizer use, agronomic and by-product management, theoretical-practical training to raise awareness among producers about the advantages of applying liquid fertilizers in the orchards and the elaboration, as a results to the application, an unrestrictedly random block design was established with different treatments, where the development of the plants in the lettuce crop (Lactuca sativa) was evaluated, the evaluated variables were plant height every 15 days, weight of wet plant and dry matter, a statistical analysis of variance (Andeva) and a Tukey significance test were performed (P <0.05) with the R-biometry program, resulting in significant differences with T2, being the best treatment for the variables height, fresh weight and dry matter of the plant, in comparison with the absolute control.

Key Words: Agrochemicals, biofertilizer, good agricultural practices (GAP), orchard, soil

Introducción

La agricultura moderna ha ido aumentando progresivamente la utilización de productos químicos, no sólo con la finalidad de incrementar la productividad de los sistemas agrícolas, sino también para evitar su disminución debido a prácticas de manejo inadecuadas. Los agroquímicos corresponden a un amplio espectro de sustancias químicas orgánicas e inorgánicas utilizadas para el control de plagas y enfermedades en las actividades agropecuarias, lo que ha provocado episodios críticos de contaminación en el ambiente (Galán-Huertos, 2003).

Con respecto a dicha problemática, en la actualidad se hace necesario establecer prácticas que permitan mantener la producción preservando el recurso suelo, para ello los biofertilizantes constituyen una alternativa de desarrollo que son uno de los elementos más valiosos que puede utilizar la agricultura, en los sistemas productivos es viable y sumamente importante para lograr un desarrollo agrícola ecológicamente sostenible, ya

que permite una producción a bajo costo, no contamina el ambiente y mantiene la conservación del suelo desde el punto de vista de fertilidad y biodiversidad.

Los biofertilizantes son una herramienta biotecnológica que consiste en aplicar microorganismos que ayudan a mejorar la disponibilidad de nutrientes en el suelo y así logran disminuir los efectos causados por el exceso de fertilizantes en donde su principal objetivo es movilizar la disponibilidad de nutrientes con base en su actividad biológica, ayudar a recuperar la microbiota perdida y a su vez, mejorar la salud del suelo en general (Ismail, 2014).

El uso de biofertilizantes en diferentes cultivos ha evidenciado efectos positivos en la fertilidad del suelo. Por tal motivo y sabiendo que la principal actividad económica llevada a cabo en el municipio de Colon departamento del Putumayo es la agricultura, con la presente investigación se sensibilizo a horticultores propietarios de huertas caseras, sobre las ventajas del empleo de biofertilizantes y la contribución que estos traen a la producción limpia y aportan al equilibrio de los agrosistemas, a través de la elaboración de cuatro tipos de biofertilizantes, pantotenato, caldo de mantillo de bosque, caldo anaeróbico y supermagro, evaluando su respuesta con un diseño de bloques estrictamente al azar con plantas de lechuga (*Lactuca sativa*), como una alternativa de las buenas prácticas agrícolas (BPA).

El objetivo general fue evaluar cuatro tipos de biofertilizantes en hortalizas como una alternativa de las buenas prácticas agrícolas (BPA), con productores del municipio de Colon Putumayo Colombia.

Objetivos específicos.
Sensibilizar a los productores sobre las ventajas de la aplicación de los biofertilizantes en las huertas.
Replicar la elaboración de los biofertilizantes en cada uno de los sistemas.
Determinar la respuesta de las plantas a la aplicación de este tipo de productos.

Materiales y métodos

La investigación se realizó en el municipio de Colon Putumayo. La metodología utilizada abarca los siguientes aspectos; **a)** Se seleccionó los sistemas agrícolas (huertas caseras) **b)** Se realizó una encuesta a la población total de agricultores hortícolas y productores agrícolas de la zona, la cual permitió obtener información sobre el manejo de semillas, suelo, uso de fertilizantes, manejo agronómico, de subproductos y de buenas prácticas agrícolas (BPA) **c)** Una vez socializada la propuesta se procedió a la elaboración de los biofertilizantes, se realizó una capacitación teórica práctica y se facilitaron guías para

cada horticultor las cuales contenían todos los procedimientos y materiales que se utilizaron para la elaboración de los abonos líquidos.

Para la elaboración de los cuatro biofertilizantes se utilizó la metodología propuesta por Fenalce (2013) para el pantotenato y caldo anaeróbico y Ramírez G (sf) para el supermagro y caldo de mantillo de bosque.

d.) Se evaluó la respuesta a la aplicación de los cuatro biofertilizantes en el cultivo de lechuga (*Lactuca sativa*), con un diseño de bloques irrestrictamente al azar. Una vez seleccionado el lote para implantar la investigación se estableció los siguientes tratamientos:
T0: Testigo sin ninguna aplicación
T1: 50 cc Pantotenato + 10 g de abono orgánico tipo compost
T2: 50 cc Caldo anaeróbico + 10 g de abono orgánico tipo compost
T3: 50 cc Supermagro + 10 g de abono orgánico tipo compost
T4. 50 cc Caldo de mantillo de bosque + 10 g de abono orgánico tipo compost

Las aplicaciones se realizaron la primera al momento del trasplante y la segunda al a los quince días siguiente y la tercera al mes.

Parámetros evaluados

Altura de planta cada 15 días, peso de planta en húmedo y materia seca al final del ciclo productivo.

Análisis de la información

La información recolectada por la respuesta de los biofertilizantes en la lechuga se evaluó estadísticamente por un análisis de varianza (Andeva) y una prueba de significancia de Tukey para los valores ($P<0,05$), con el programa R - biometría.

Resultados y discusión

Evaluación de las variables respuesta del crecimiento de la planta de lechuga (*Lactuca sativa*), a la aplicación de biofertilizantes al suelo.

•Altura de la planta

Para esta variable se presentaron diferencias significativas ($P<0,05$) como se muestra en la tabla 1, para los cinco tratamientos evaluados, la prueba de significancia de Tukey corrobora esta afirmación porque se presenta diferentes en letras de significancia para esta variable tabla 2, presentando los mejores resultados el T2 caldo anaeróbico con un valor de 17,15 g.

Tabla 1.
Análisis ANOVA para altura de planta

Fuente de variabilidad	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor -F	Valor –P
Tratamiento	4	95,692	23,9230	19,5290	0,00003 *
Bloque	3	1,510	0,5033	0,4109	0,74816
Residual	12	14,700	1,2250		
Total	19	111,902			

Fuente: Esta investigación

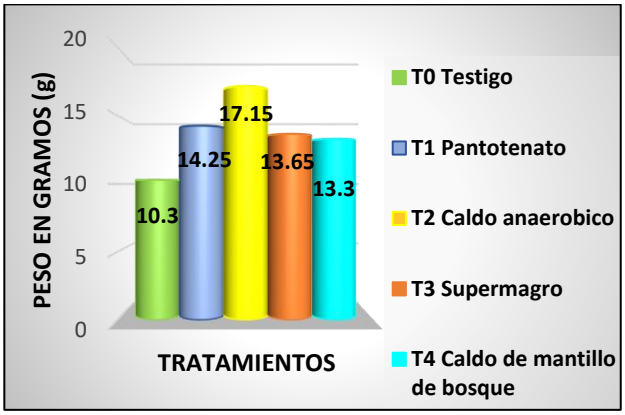
Tabla 2.
Prueba de Tukey para altura de planta

Agrupación de Tukey	Tratamientos	Media
a	T2	17,15
b	T1	14,25
b	T3	13,65
b	T4	13,3
c	T0	10,3

Fuente: Esta investigación

De acuerdo a la prueba de tukey, hay un nivel de confianza del 95% (α= 0,05) de que el tratamiento 2(a), en este caso 50 cc Caldo anaeróbico + 10 g de abono orgánico tipo compost es el que causa efecto diferencial sobre la altura de la planta. El tratamiento T2 (a), que corresponde al caldo anaeróbico, es el que presenta la altura significativamente mayor respecto a los demás con un valor de 17,15 g y el tratamiento 0 (c), que corresponde al testigo es el que presenta la altura significativamente menor respecto a los demás con valor de 10,3 g, como se muestra en la Figura 1.

Figura 1. Promedio altura planta



Fuente: *Esta investigación*

Al respecto (Terry, Pino, & Leyva, 2001), afirman que la aplicación de biofertilizantes aumenta el número y la diversidad microbiana. Al aumentar los microorganismos del suelo se aceleran los procesos microbianos, de esta forma aumentan las cantidades de nutrientes que pueden ser asimilados por las plantas y se acelera los procesos de desarrollo y aumenta el rendimiento, sin grandes insumos externos. El uso de estos biopreparados origina procesos rápidos de fertilización, consumiendo escasa energía no renovable y sin daños del medio ambiente. Además, ya sea que los procesos se realicen en la raíz o bien en la hoja (fertilización foliar), las plantas se benefician en un plazo muy breve.

- **Peso fresco planta**

En la tabla 3, al evaluar la variable peso fresco de la planta se presentaron diferencias estadísticas significativas (P< 0,05) entre los cinco tratamientos, la prueba de significancia de Tukey tabla 4, determina que el T2 caldo anaeróbico con 177,2 g difiere significativamente con el T0 Testigo, en comparación con el T3 y T4 que no presentaron diferencias significativas.

Tabla 3. Análisis ANOVA para peso fresco de planta

Fuente de variabilidad	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor -F	Valor –P
Tratamiento	4	43,648	10912,1	3,5717	0,03856 *
Bloque	3	1,868	622,5	0,2038	0,89181
Residual	12	36,612	3055,2		
Total	19	82,178			

Fuente: *Esta investigación*

Tabla 4. Prueba de Tukey para altura de planta

Agrupación de Tukey	Tratamientos	Media
a	T2	177,5
ab	T1	94,85
ab	T4	80,525
ab	T3	58,175
b	T0	43,8

Fuente: *Esta investigación*

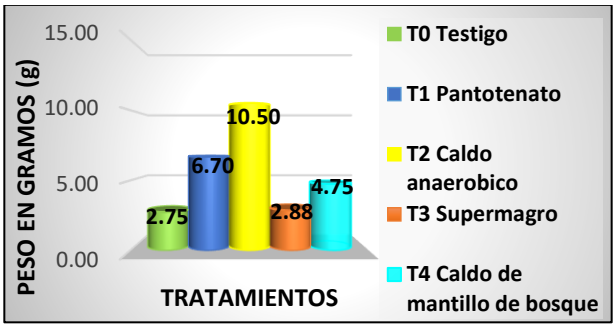
De acuerdo a la prueba de Tukey con un 95% (α= 0,05) de confianza se observa que el mejor tratamiento es el 2 y corresponde a 50 cc Caldo anaeróbico + 10 g de abono orgánico (letra a), por ende, se observa significancia respecto a el peso fresco de la planta con un valor de 177,5 g, en contraste al T0 Testigo sin ninguna aplicación con un valor de 43,8 g. Este tratamiento concuerda con la variable de la altura de la planta, donde este presento significancia.

Al respecto (Pino Molano, 2014) manifiesta que desde la perspectiva del rendimiento, los biofertilizantes producen sustancias muy activas que, al interactuar en su conjunto con el metabolismo vegetal, provocan diferentes efectos beneficiosos entre ellos el incremento en el número de plántulas que emergen, acortamiento del ciclo de los cultivos entre 7 y 10 días, aumento en los procesos de floración fructificación, incremento entre 5 y 20% del rendimiento y la obtención de frutos con mayor calidad comercial (aspecto y tamaño).

- **Materia seca**

Con los valores promedios obtenidos de materia seca el tratamiento que mayor resultado obtuvo fue el T2 caldo anaeróbico, con un valor de 10,5 g, debido a los altos niveles de elementos nutritivos que este tiene y brinda a la planta, seguido por el pantetonato con 6.70 g, caldo de mantillo de bosque 4.75 g y finalmente el testigo sin ninguna aplicación con un valor de 2,75 g. Como se muestra en la Figura 3.

Figura 3. Promedio materia seca



Fuente: *Esta investigación*

La materia seca a nivel de nutrición representa la cantidad de alimento menos el agua contenida en variados vegetales. Está constituida por una fracción orgánica y otra inorgánica. El componente inorgánico está dado por los minerales que poseen el vegetal, principalmente potasio y silicio, pero también, la mayoría de los compuestos orgánicos contienen elementos minerales como componentes estructurales, por ejemplo, las proteínas contienen azufre, y muchos lípidos, carbohidratos y fósforo (Sanchez , Ligarreto, & Leiva, 2012).

Análisis de las capacitaciones

Durante el proceso de desarrollo de la investigación fue necesario tener encuentros con los propietarios de las huertas, donde se reunieron para socializarles el proyecto, en efecto se obtuvo gran acogida por parte de cada uno de los participantes, se organizaron grupos de trabajo para realizar capacitaciones teórico prácticas en cuanto al manejo y elaboración de los biofertilizantes.

Esta metodología adoptada con ellos permitió generar mayor conocimiento de la implementación de este tipo de productos para sus cultivos además se sensibilizo a las personas con relación al cuidado del medio ambiente y por ende la conservación del recurso suelo.

Teniendo en cuenta que la investigación se realizó con 16 horticultores del municipio de Colon Putumayo, de acuerdo a la tenencia de tierra un 93.75% son propietarios de los sistemas evaluados y tan solo 6.25 % son arrendatarios, de los cuales un 75 % son mujeres (12) manejan y trabajan sus huertas, mientras que el 25% son hombres (4). De lo anteriormente encontrado se puede deducir que la mujer cumple un papel fundamental y muy importante en la seguridad alimentaria de las familias.

Por lo tanto, parece evidente que la mujer juega un papel en la conservación de la diversidad agrícola y que este conocimiento debería ser tenido en cuenta a la hora de diseñar políticas enfocadas a garantizar la seguridad alimentaria (Bridge, 2014).

Análisis de las encuestas

La encuesta se aplicó a 16 horticultores encontrados en el municipio de Colon, se puedo evidenciar que el 81.25 % de los propietarios no realizan análisis de suelo para implantar sus diferentes tipos cultivos, debido a que no hay presencia de profesionales que orienten en los procedimientos para realizar los respectivos análisis y también porque desconocen del tema y sus costos, mientras que un 18,75 % si realizan este tipo de evaluaciones previamente antes de trabajar el suelo.

De acuerdo con lo anterior se recomienda la realización de los análisis de suelos porque es una herramienta de gran utilidad para diagnosticar problemas nutricionales y establecer recomendaciones de fertilización. Entre sus ventajas se destaca por ser un método rápido y que permite ser utilizado ampliamente por agricultores (Molina, 2006).

El 100% de los agricultores hacen uso de herramientas manuales (palendra, machete, rastrillo, azadón) al momento de establecer sus cultivos, lo anterior refleja la importancia que tiene para cada uno de ellos el trabajo del suelo utilizando este tipo de herramientas. Un 81.25 % de los encuestados si aplica enmiendas calcáreas a sus cultivos mientras que un 18.75 % no lo hacen. Se puede evidenciar que la mayoría de los agricultores si realizan este tipo de actividad ya que como ellos lo manifestaron aporta nutrientes al suelo, desinfecta, mata las plagas, ayuda a la descomposición de los abonos orgánicos y se generan productos más sanos.

El 81.25 % de los agricultores agregan abonos orgánicos a sus cultivos, un 18.75 % hacen uso de los fertilizantes sólidos, el 12.5% utilizan foliares y radiculares, mientras que un 25% implementan todas las anteriores. De los resultados obtenidos se destaca la importancia que tiene para la mayoría de los encuestados el uso de los abonos orgánicos, ya que como ellos lo manifestaron la implementación de este tipo de fertilización trae para sus cultivos mayor y buena producción, se generan productos más sanos libres de químicos y se contribuye con el cuidado del recurso suelo

La tendencia que tienen los productores encuestados en lo relacionado a si maneja Buenas prácticas agrícolas (BPA), si conocen la preparación y elabora biofertilizantes y si le gustaría capacitarse en este tema, determinando que los 16 encuestados fueron capacitados en este tema.

Conclusiones

La respuesta a la aplicación de los cuatro tipos de biofertilizantes en plantas de lechuga *(Lactuca sativa),* en las variables altura, peso en fresco y materia seca de la planta, se pudo determinar que el mejor tratamiento correspondió al caldo anaeróbico ya que se obtuvo mayor asimilación en el desarrollo normal de la planta, con un valor máximo de altura de 17,15 cm, promedio de peso de la planta de 177,5 g y un porcentaje de materia seca de 10,5 g.

Con los resultados de la encuesta se puede evidenciar que un 81.25 % de los encuestados aplican a sus huertas abonos orgánicos, no realizan análisis de suelos previo a implantar sus cultivos, no saben que es un biofertilizante al igual que no conocen de su elaboración lo que permitió a través de la investigación generar mayor conocimiento de ellos y finalmente el 100% de las personas encuestadas se capacitaron

A partir de la metodología adoptada con los agricultores hortícolas a través de las capacitaciones se logró sensibilizar en cuanto a la conservación del medio ambiente a través de la adopción de prácticas orgánicas que generen una agricultura más sostenible.

Recomendaciones

La elaboración de biofertilizantes no requiere de costos elevados, así como tampoco precisos de alta tecnología razón por la cual está al alcance de todo agricultor, es por ello que se hace muy necesario que se adopten y se incentiven este tipo de prácticas no solo por parte de algunos agricultores sino en su gran mayoría para que se conozcan este tipo de métodos con el fin de crear una agricultura más sostenible y amigable con el medio ambiente.

Realizar replicas en otros sistemas para poder evaluar la respuesta que generan los biofertilizantes, con el fin de hacer mayor divulgación de los beneficios que estos tienen, como una alternativa de las buenas prácticas agrícolas de igual manera realizar constantemente capacitaciones a los agricultores para aumentar el conocimiento sobre las buenas prácticas agrícolas.

Referencias bibliográficas.

Baez Espinoza , J. L., & Marin Lopez, J. R. (2009). Evaluacion de una mezcla de abonos organicos versus fertilizacion sintetica sobre el crecimiento y rendimiento del cultivo de maiz (Zea mays L.) . *Repositorio UNA*, 27.

Betancourt, l., Pareja, R. I., Conde, A., Castellanos, A. F., Moreno, D., & Aguilar, F. (2011). Nutricion y alimentacion animal. *Scielo*, 35.

Bridge. (2014). Genero y seguridad alimentaria. Hacia una seguridad alimentaria y nutricional con justicia de genero . *Instituto de Estudios sobre el Desarrollo, Universidad de Sussex*, 121.

Castro, H., & Munevar, O. (2013). Mejoramiento quimico de suelos acidos mediante el uso combinado de materiales encalantes. *Scielo*, 8.

Chaves Bedoya, G., Ortiz Moreno, M. L., & Ortiz Rojas, L. Y. (2013). Efecto de la aplicacion de agroquimicos en un cultivo de arroz sobre los microorganismos del suelo. *Scielo*, 7.

Fenalce. (2013). Federación Nacional de Cultivadores de Cereales y Leguminosas. *Propuesta para una sostenibilidad productiva del fríjol voluble en el Valle de Sibundoy.*

Galán-Huertos, E. J.-A.-F. (2003). Contaminacion de suelos por compuestos organicos. *Informe final.* , 185 p.

García, M. (., & Rodríguez, A. (. (2003). Producción orgánica: Aportes para el manejo de sistemas ecológicos en Uruguay. *Montevideo : PREDEG*.

Garcia, M. H. (2013). El papel de la mujer en la seguridad alimentaria . *Dialnet*, 17.

Gutierrez, M. (1997). Nutricion mineral de las plantas: avances y aplicaciones. *MAG*, 11.

Ismail, E. G. (2014). Effect of manure and biofertilizers on growth, yield, silymarin content, and protein expression profile of Silybum marianum. . *Advance in Agriculture and Biology*, 2 (1), 36-44.Agricultura Orgánic.

Molina, E. (2006). Analisis de suelos y su interpretacion. *Scielo*, 8.

Pino Molano, M. (2014). Evaluacion de biofertilizantes en las praderas del departamento del Cauca. *Bogota: Fundacion Alpina*, Pp. 34-35.

Plazas, N. Z., & Garcia, J. F. (2014). Loa abonos organicos y la agremiacion campesina: una respuesta a la agroecologia. *Scielo*, 7.

Sanchez , J. D., Ligarreto, G. A., & Leiva, F. R. (2012). Variabilidad del crecimiento y rendimiento del cultivo de maiz para choclo (Zea mays L.) como respuesta a diferencias en las propiedades quimicas del suelo en la sabana de bogota, colombia. *Scielo*, 12.

Solidarios, I. N. (2012). Instituto Nacional de Seguros Solidarios Gestion Empresarial en Salud Ocupacional . *INS*, 12.

Terry, A., Pino, M. d., & Leyva, A. (2001). Biofertilizantes: Alternativa sostenible para la producción de tomate en Cuba. *Cuba : Instituto Nacional de Ciencias*.

ACODAL
ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
65° CONGRESO INTERNACIONAL
Agua, Saneamiento, Ambiente y Energías Renovables
Bogotá - Colombia
Centro de Convenciones Ágora
Julio 13, 14 y 15 de 2022

Aplicación de Óxido de Zinc como Nano fertilizante para un suelo de Cultivo de Mora del Municipio de Charta Santander con sistema de Riego automatizado.

Sandra Natalia Correa[1*], Silvia Daniela Niño[1], Brucxen Núñez[1], Angélica Muskus[1] , Cesar Augusto Aceros[2], Daniel Bayona[3], Angie Saavedra[3]

[1] Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad Pontificia Bolivariana
[2]Facultad de Ingeniería Electrónica, Universidad Pontificia Bolivariana
[3] Dirección de Sostenibilidad, Alianza Biocuenca
**Autor corresponsal:* Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad Pontificia Bolivariana, kilómetro 7, vía a Piedecuesta, Floridablanca, Santander. 681007 . Colombia. Email: sandra.correa@upb.edu.co

Abstract

In this work, zinc oxide nanoparticles will be applied as soil Nano fertilizers from a Charta Santander blackberry crop. In order to apply the synthesized nanoparticles, an analysis was carried out to determine the physicochemical properties of the soil, such as: Organic matter by calcination, CIC and Zinc present in the different types of soil sampled; in order to obtain optimal results and to know the initial conditions of the soil.
Bioreducing substances were synthesized by green chemistry (vetiver) by means of Soxhlet extraction and preparation of the fruit extract of the blackberry of the genus Rubus sp in a water bath, to synthesize zinc oxide nanoparticles and evaluate the behavior of the different concentrations based on (1 %, 2%, 5%) to analyze the nanoparticle fertilizer ratio, in order to determine the efficiency of nanoparticles for the inhibition of pathogenic microorganisms in the soil and thus reduce the use of pesticides, insecticides in the cultivation of blackberries in the municipality of Charta Santander.

KeyWords (en negritas): irrigation sistem, nanofertilizer, soils, zinc.

ACODAL
ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
65° CONGRESO INTERNACIONAL
Agua, Saneamiento, Ambiente y Energías Renovables
Bogotá - Colombia
Centro de Convenciones Ágora
Julio 13, 14 y 15 de 2022

APLICACIÓN DE ÓXIDO DE ZINC COMO NANOFERTILIZANTE PARA UN SUELO DE CULTIVO DE MORA DEL MUNICIPIO DE CHARTA SANTANDER CON SISTEMA DE RIEGO AUTOMATIZADO

Resumen

En este trabajo se aplicaron nanopartículas de óxido de Zinc como nano fertilizantes de suelos provenientes de un cultivo de mora de Charta Santander. Para poder aplicar las nanopartículas sintetizadas se realizó un análisis en la determinación de las propiedades fisicoquímicas del suelo como: Materia orgánica por calcinación, CIC y Zinc presentes en los diferentes tipos de suelo muestreados; con el fin de obtener óptimos resultados y saber las condiciones iniciales del suelo.

Se desarrolló síntesis de sustancias biorreductoras por química verde (vetiver) mediante la extracción Soxhlet y preparación del extracto de fruto de la mora del género Rubus sp a baño maría, para sintetizar nanopartículas de óxido de zinc y evaluar el comportamiento de las diferentes concentraciones establecidas (1%, 2%, 5%) para analizar la relación abono nanopartículas, con el fin de determinar la eficiencia de las nanopartículas para la inhibición de microorganismos patógenos en suelo y de esta manera disminuir el uso de plaguicidas, insecticidas en el cultivo de mora en el municipio de Charta Santander. Adicionalmente la utilización de los recursos hídricos demandados por la agricultura tiene la necesidad de administrarse con eficiencia y la irrigación es vital. Se propone un sistema de riego que suministra cantidades de agua controladas a las plantas de la huerta en jornadas de riego programadas.

Palabras clave: nanofertilizantes, sistema de riego, suelos, zinc.

Introducción

Colombia necesita de aportes en el desarrollo productivo sostenible en las comunidades que habitan en cuencas de Santander del bosque alto andino que rodean el Páramo Santurbán. En zonas de Santander se están utilizando demasiados pesticidas en cultivos de mora que pueden llegar a fuentes hídricas por lixiviación o escorrentías contaminando los acuíferos y por ende los suelos.

El cultivo de mora en Colombia tiene más de 15,000 hectáreas sembradas. Existen 279 municipios que producen la mora, distribuidos en 18 departamentos. Para el 2018 las hectáreas cosechadas con mora fueron de 13,585, con una reducción de 129,977 Toneladas y un rendimiento de 9.5 toneladas por hectárea. Las especies más cultivadas de la mora en Colombia son las del género *Rubus glaucus y Rubus bogotensis* cultivadas en Antioquia, Cundinamarca, Boyacá y Valle. La mora es una planta de hábito perenne, con tallos rastreros, espinosos, hojas trifoliadas. La mora es una planta dicotiledónea, perteneciente a la familia de Rosáceas]. Entre los dos mayores departamentos productores de mora esta Santander con una área sembrada de 2,804 ha, áreas cosechadas de 2,583 ha, con una producción en toneladas 29,918 con un porcentaje de participación de

producción de 23,02% [1]. En Santander las zonas de mayor producción de mora están Piedecuesta con 690 ha en áreas sembradas, en municipios como Charta Santander la cantidad de hectáreas sembradas son 225 ha con una participación de producción de 5,46% para el año 2018 Manejo fitosanitario del cultivo de la mora, 2011.

Comportamiento del cultivo de Mora en Santander

El comportamiento del área sembrada de mora presenta ciertos incrementos, pero también presenta algunos desequilibrios entre el año 2013 a 2016. Al comparar el área sembrada de 2009 con el área sembrada del año 2018, en el periodo de diez años se sembraron en Santander 1,307 hectáreas más, un aumento que representa el 46,61%, es decir, 130.7 hectáreas por año (4.66%), obteniendo un comportamiento muy importante por los impactos de la inversión realizada por las Alianzas Productivas en mora.

Agentes Microbianos en el cultivo de mora

En los años 2010 y 2011 la fuerte ola invernal asociada al fenómeno de La Niña presentó un factor impactante en el aumento de la humedad de los terrenos e incremento de la humedad relativa en los cultivos de mora, favoreciendo la incidencia y severidad de varias enfermedades, principalmente las que son causadas por hongos de los géneros *peronospora, Coll etotrichum* y *Botrytis*. Cuando se generan periodos largos de lluvias, aumento de la humedad ambiental, la frecuencia e intensidad de las precipitaciones presentan condiciones favorables para la producción y esparcimiento de patógenos hacía lugares no afectados siendo atacados los de la planta, el rendimiento de las cosechas y la baja calidad de la fruta. Ante esta circunstancia se deben aplicar medidas inmediatas de prevención y control para evitar el aumento de enfermedades y plagas. (Manejo fitosanitario del cultivo de la mora, 2011).

Como una solución de los problemas de ubicados en los cultivos de Charta Santander y en específico los cultivadores de mora, con el presente artículo se evaluaron las propiedades fisicoquímicas del suelo donde se realiza el cultivo de mora, adicionalmente se aplicó la biotecnología sin uso de pesticidas, aplicando nanofertilizantes y nanofungicidas. De igual forma se implementó para las muestras un sistema de riego de agua que permitió una disminución de agua por planta cultivada.

Para este trabajo se emplearon nanopartículas de Óxido de Zinc sintetizadas a partir del extracto de vetiver y extracto de mora. Los parámetros fisicoquímicos del suelo que fueron analizados a escala laboratorio fueron: Materia orgánica, CIC y Zn total. Por medio de este artículo se presenta la aplicación de la biotecnología por medio de nanopartículas utilizadas como nano-fertilizantes y nano-fungicidas. Con la adición de un sistema de riego controlado desde tecnologías de forma simultáne, (Yamamoto, O. 2001).

Sistema de Riego automatizado para los cultivos y suelos

El uso eficiente y técnico del recurso hídrico en agricultura es una labor de vital importancia. Las condiciones de humedad para las plantas del experimento son de vital importancia para la evaluación de las nanopartículas, (Lapo & Pérez, 2013) En condiciones naturales de cielo abierto, la variabilidad de precipitación hace que el control de los experimentos de aplicación de nanopartículas sea muy difícil de manejar. Por lo anterior se diseñó un sistema de riego automatizado por microaspersión para aplicar 2 litros de agua por planta del experimento. De esta forma se logró aplicar irrigación a muestras de suelo de un cultivo de mora de forma controlada por los experimentos.

Materiales y Metodología

La metodología que se utilizó se dividió en cuatro etapas: la primera etapa fue la determinación de propiedades fisicoquímicas iniciales del suelo; la segunda etapa fue la síntesis de nanopartículas de óxido de Zinc, la tercera etapa se realizó el análisis de las nanopartículas de óxido de Zinc como fertilizantes y en la cuarta fase se diseñó y aplicó un sistema de riego controlado.

Etapa 1. Muestreo y caracterización fisicoquímica del suelo

Las muestras de suelo fueron tomadas en 3 fincas ubicadas en el municipio de Charta, Santander. La finca No 1 se encuentra ubicada en la vereda Cristalinas, la finca No 2 se encuentra ubicada en la vereda Roble y la finca No 3 tiene cultivo de mora y se encuentra ubicada en la vereda Cristalinas. Las muestras de suelos fueron analizadas en el laboratorio de suelos de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga y en laboratorio de Suelos de la Universidad
Industrial de Santander, donde se analizaron las diferentes propiedades fisicoquímicas del suelo tales como: capacidad de intercambio catiónico CIC, materia orgánica y cantidad de Zinc.

El contenido de materia orgánica se determinó por medio de pérdida de peso por ignición, donde se halla el porcentaje de materia orgánica del suelo mediante la diferencia de peso seco y húmedo luego de ser pasado en el horno y la mufla.

Etapa 2: Síntesis de nanopartículas por química verde y evaluación de nanopartículas como fertilizantes.

a) **Preparación del extracto a partir de las hojas de *Chrysopogon zizaniodes,* vetiver.**

Se recolectaron hojas de Pasto Vetiver de la Universidad Pontificia Bolivariana. Seguidamente, se lavaron las plantas con agua destilada, se retiró el exceso de humedad con papel absorbente. Se cortaron las hojas en trozos de aproximadamente 10 cm de longitud y se procedió a secar las hojas al aire libre por un periodo de 3 días.

b) Extracción de las sustancias biorreductoras a partir de *Chrysopogon zizaniodes,* vetiver

Como sustancias biorreductoras se utilizó el extracto de hoja de la especie vegetal *Chrysopogon zizaniodes,* conocida como vetiver, aportante de terpenos y extracto de fruta de la planta *Rubus s*p, conocida como mora, aportante de flavonoides. Para extracción se pesaron 40 g de material vegetal y 250 mL de solvente (alcohol etílico al 70% grado analítico). Se realizó una extracción sólido-líquido mediante el equipo Soxhlet, por un tiempo de 6 horas a 300 °C

c) Extracción de terpenos y Flavonoides de mora

Se utilizaron 500 g de mora madura, donde se eliminó el cáliz de cada fruto, se lavó con abundante agua destilada. Se trituró el fruto y se tomaron 25g del material al cual se le adicionó 100 mL de la solución de etanol al 50%. Seguidamente, se calentó a 58°C en baño maría por un tiempo de 3 horas. Finalmente, se retiró el extracto del calentamiento y se filtró el material. El extracto del fruto obtenido se almacenó en refrigeración cerca de 6°C.

d) Síntesis por química verde de nanopartículas de óxido de zinc.

Se sintetizaron nanopartículas de óxido de zinc (ZnO) por química verde, usando el proceso de precipitación asistido por ultrasonido. Para la obtención de las nanopartículas de ZnO, se disolvió 5 g de cloruro de zinc ($ZnCl_2$) en el extracto acuoso (150 mL) en una proporción de 30:120 v/v bajo. Luego se realizó agitación magnética a temperatura ambiente durante 20 min. Se adicionó una solución de NaOH. (5 M) gota a gota hasta obtener un pH 12. Luego se colocó en un equipo de ultrasonido (WiseClean WUC-A06H, 60 Hz) durante 15 min. Luego se centrifugó a 5000 rpm durante 10 min. El precipitado se purificó mediante lavados con agua destilada y etanol. Finalmente se calcinó en una mufla bajo una atmosfera natural, con temperatura de 500 °C por 3 h consiguiendo una rampa de incremento de 5 °C/min. Las nanopartículas sintetizadas fueron caracterizadas por SEM y EDS.

Etapa 3. Análisis de las nanopartículas de óxido de Zinc como fertilizantes

En esta última fase se realizó el análisis de las nanopartículas de óxido de Zinc ya sintetizadas como fertilizantes mediante la aplicación en suelo de distintas fincas con diferentes concentraciones (1%,2% y 5%) de nanopartículas con 200 g de abono, mediante el método de atomización. Esto con el fin de evaluar las concentraciones de las propiedades fisicoquímicas tenidas en cuenta en diferentes tiempos (cada 15 días).

Etapa 4. Sistema de Riego

Como ya fue mencionado, un sistema de riego permite tener un mayor control de la irrigación de las plantas del experimento y manteniendo niveles de humedad constantes e independientes de las condiciones climáticas de un cultivo a cielo abierto. Para el desarrollo del sistema de riego se consideraron dos sistemas posibles. Un sistema básico con capacidades limitadas que serían: Riego controlado por volumen, Reloj de tiempo real, Sensor de flujo de agua a las muestras de suelo, bomba de 12 VDC controlada por modulación de ancho de pulso, adicionalmente se instaló un sensor de humedad FS200-

SHT10 para monitorear la humedad del suelo de las plantas. Un segundo sistema de riego más completo que incluye todo lo anterior y adicionalmente: comunicación bidireccional por mensajes de texto en red celular, pantalla para indicación de parámetros de operación y teclado para programación de operación. Los componentes del sistema se muestran en la figura 1. Los componentes son: 1) Fuente DC, 2) pantalla LCD, 3) Reloj de tiempo real, 4) módulo de GSM y 5) Microcontrolador Arduino nano.

Resultados y Discusión de Resultados

El porcentaje de materia orgánica de las muestras analizadas de suelo inicial fue de 12.92% para pérdida por ignición en la finca No 1, 5.59% en la finca No 2 y 16.06% en la finca No 3, clasificando el suelo como un mineral alto, para la finca En la Finca No. 1 y No. 3 que relaciona la cantidad de materia orgánica con el clima del lugar donde fue muestreado el suelo, y teniendo una clasificación en la finca No. 3 como un mineral medio. Este factor es de gran importancia porque a mayor temperatura mayor será la acción de degradación de materia orgánica por los microorganismos.

Los valores promedios obtenidos de CIC en las muestras de suelos iniciales analizadas fueron de 22.0 meq/100g en la finca No 1, 10.0 meq/100g finca No 2. y 25.0 meq/100g finca No 3, siendo clasificados como bajo para la finca No 2 y un valor medio para las fincas No 1 y 2, esto se relaciona con la cantidad de cationes intercambiables. Cuando la CIC es alto esto representa una buena saturación de bases, indicando una gran capacidad potencial de suministro de reserva de Ca, Mg, K, Na. También el suelo brinda mayor capacidad de retención de nutrientes y buena fertilidad.

Análisis de resultados de la síntesis de nanopartículas de Óxido de Zinc

Las nanopartículas biosintetizadas a partir del extracto de vetiver y Rubus sp con la adición de Óxido de Zinc, fueron analizadas por microscopia electrónica (SEM) y EDS. En la Figura 4, se muestra la micrografía obtenida para las anopartículas de óxido de zinc obtenidas por síntesis de química verde a partir de extractos de Vetiver. En cuanto a cantidades producidas se obtuvieron en mayor cantidad 4.0 g de nanopartículas de ZnO sintetizadas a partir de extractos de Vetiver (1:0), al igual que Vetiver:Mora (1:2) obteniendo 3.9 g.

Los tamaños de las nanopartículas obtenidas por SEM, están entre 50 a 100 nm. Se observa formas de tubos amorfos para las nanopartículas de ZnO. En lo referente a la exposición del vetiver secado en horno proporción 1:0, se obtiene una composición elemental de Carbono en un 9,91% de la misma manera el Oxigeno alcanza un 18,35% de influencia de la misma manera el zinc es quien tiene mayor proporción alcanzando en total 48,64%, estos componentes juntos constituyen el 76,69%.

Propiedades Fisicoquímicas del suelo después de aplicar nano fertilizantes

En la figura 2, se presenta el porcentaje de materia orgánica para diferentes matrices de los suelos de las Fincas No 1, 2 y 3 a diferentes concentraciones de nano fertilizantes sintetizados por química verde. En la Figura 4, se puede apreciar el efecto de la aplicación de nano partículas de óxido de zinc como fertilizante en la materia orgánica propia del sistema la cual suele estar constituida por residuos animales, vegetales y medio ambientales naturales, donde estos contienen un consorcio microbiano y fúngico diferente en función de los compontes que conformen la matriz del suelo. Por tanto, en la Finca No 3 se apreció una inhibición o reducción de esta materia orgánica dado a una posible acción fungicida o bactericida ejercida por el nano fertilizante. Sin embargo, en la Finca No 1 y No 3 se aprecia un crecimiento de materia orgánica representativo dando indicios de que es posible que el micro nutrientes suministrado por el nano fertilizante promueva la formación de materia orgánica, salvo para el caso del 1% de mora vetiver, dado a que es posible que para este tipo de nano fertilizante el 1% del mismo no sea suficiente para lograr tal efecto.

En la Figura 3, se aprecia que el intercambio catiónico (CIC) aumenta en los suelos evaluados de la Finca No 2, el cual se puede atribuir al crecimiento indirecto que se dio en el porcentaje de materia orgánica en esta misma matriz, promoviendo un aumento en la capacidad de transferir cationes en el suelo o la capacidad de retenerlos, esto dando un indicio que al tratar los suelos de la Finca el No 2 se pueda promover la retención e intercambios de nutrientes inhibiendo los procesos naturales de lixiviados de los mismos. Por otro lado, los datos de intercambio catiónico (CIC) en las matrices de la Finca No 1 y la No 3 presentan una disminución de la capacidad de intercambiar y retener nutrientes, para el caso de la Finca del No 1 se puede atribuirá que la materia orgánica no sufrió fluctuaciones representativas, por otro lado, la Finca No 3 que si tuvo incrementos de materia orgánica no tuvo el efecto de aumentar el proceso de intercambiar y retener nutrientes, esto se puede atribuir a la calidad de sustancias por las cuales se encuentre constituida cada matriz de suelo.

Análisis de Nanofertilizantes en los suelos

En la figura 5, se puede evidenciar que la tecnología de nano fertilizantes que contienen zinc como uno de los micronutrientes en ausencia en los suelos trabajados logra impactar de manera positiva en todas las matrices de los suelos estudiados de las Fincas No1, No 2 y No 3. Sin embargo, es de interés mencionar que en la matriz donde se presentó el mayor crecimiento de materia orgánica presenta una cierta variación esto se puede atribuir a que el zinc suministrado fue consumido por los microorganismos presentes y por este hecho, se vio manifestado el impacto en la capacidad de intercambiar y retener los nutrientes propios y suministrados al suelo ya que la concentración de zinc en ese suelo era cercano a ser nulo.

Análisis del sistema de Riego aplicado a escala laboratorio

Parte de las consideraciones de diseño para el sistema incluyo la robustez del sistema para mantener el proceso de irrigación sobre cualquier otra funcionalidad, dando prioridad a esta función sobre las demás funciones. De acuerdo con el diseño propuesto, el sistema implementado ha funcionado dentro de los parámetros esperados, manteniendo los niveles de humedad del suelo dentro de los parámetros esperados, ver figura 6. Se observa que la humedad ha tenido un promedio alrededor de 95%. El sistema ha reportado los eventos de riego y las condiciones de humedad de las plantas por medio de mensajes de texto. Durante los 26 días de evaluación de la figura 6, se observa que aunque no hay reporte de dos días, de forma experimental se observó que el sistema funciono pero no reporto por mensaje de texto. Por la situación anterior, es necesario continuar la evaluación del sistema de riego para mejorar la confiabilidad en la comunicación y aumentar la precisión de cantidad de agua aplicada al experimento, especialmente para cantidades pequeñas de agua por planta, lo cual involucra una mayor precisión de la medición del caudal que entrega el sistema de riego.

***Agradecimientos**. Por su aporte financiero se agradece a la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga y a Alianza Biocuenca en el proyecto de investigación con código BIA05B.*

Conclusiones

En la caracterización fisicoquímica de los suelos analizados de las 3 fincas, se presentaron resultados como alta materia Orgánica entre 12.92% a 16%, dando una clasificación de suelos entre un contenido de mineral alto a medio; un intercambio catiónico CIC con valores entre bajo a medio entre un 22.0 meq/100g a un 10% y cantidad de Zinc en los suelos analizados donde se presentaron valores bajos entre 3ppm a 14ppm en la mayoría de muestras.

La morfología, los tamaños y la composición química de las nanopartículas de ZnO sintetizadas por química verde fueron comprobadas por SEM y por EDS. Las nanopartículas sintetizadas de ZnO presentaron tamaños entre 50 a 100nm a partir de extractos de pasto Vetiver. Adicionalmente se produjo en mayor cantidad de nanopartículas a partir de extractos de Vetiver.

Los suelos tratados con nanofertilizantes de ZnO en las concentraciones entre el 1, 2 y 5% presentaron resultados positivos en las matrices de los suelos, a partir de extractos vegetales presentando mas cantidad de ZnO en las provenientes de Vetiver secado al horno. .

El sistema de riego implementado a escala de laboratorio ha funcionado dentro de las expectativas presupuestadas y ha entregado 2 litros por planta diariamente. A futuro se podrá incorporar más conectividad al sistema a través de red inalámbrica y hacer más calibraciones del sistema de medición de flujo para poder manejar cantidades de agua más pequeñas.

Referencias bibliográficas

Ardila Valderrama, N. S. (13 de 11 de 2019). *Observatorio rural de Santander*. Recuperado de: https://corporacioncompromiso.org/apc-aafiles/676666686b756c6f7b70343434343434/boletin-003-observatorio-rural-desantander.pdf
Ardila, N. S. (13 de 11 de 2019). *Observatorio Rural de Santander*. Recuperado el 28,07,2021, de https://corporacioncompromiso.org/apc-aafiles.

Biblioteca digital CCB (14 de 09 de 2020). *Mora* Recuperado de: https://bibliotecadigital.ccb.org.co/bitstream/handle/11520/14319/Mora.pdf?sequence=1 &isAllowed=y

Cámara de Comercio de Bogotá (2015). *Programa de apoyo agrícola y agroindustrial vicepresidencia de fortalecimiento empresarial Cámara de Comercio de Bogotá*. Recuperado el 28,07,2021, de Https://bibliotecadigital.ccb.org.co/bitstream/handle/11520/14319/Mora.pdf?sequence=1 &isAllowed=y

Franco, G., & Giraldo, M. J. (s.f.) *El cultivo de la mora* Recuperado de: https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/12792/39929_24481.pdf?s ecquence=1&isAllowed=y#:~:text=El%20cultivo%20se%20desanolla%20mejor,Temperatura.

Herrera, A., Rinaldi, C. (2008). Synthesis and functionalization of magnetite nanoparticles with aminopropylsilane and carboxymethyldextran. *Journal of Materials Chemistry.* Recuperado el 28,07,2021, de https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2008/jm/b805256e/unauth#!divAbstract

Lapo, C., & Pérez, R. (15 de enero de 2013). Diseño óptimo de sistemas de riego a presión - Aplicación en casos (Ecuador). Obtenido de Revista de Investigación Agraria y Ambiental: https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/980

Yamamoto, O. (2001). Influence of particles size on the antibacterial activity of zinc oxide . International *Journal of inorganic materials*, 643-636.

Anexos

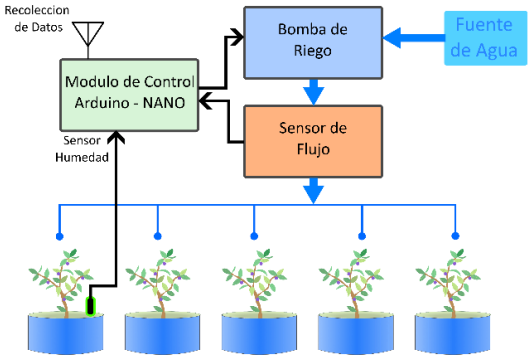


Figura 1. Módulo de Control de Sistema de Riego para los Experimentos con Nanoparticulas.

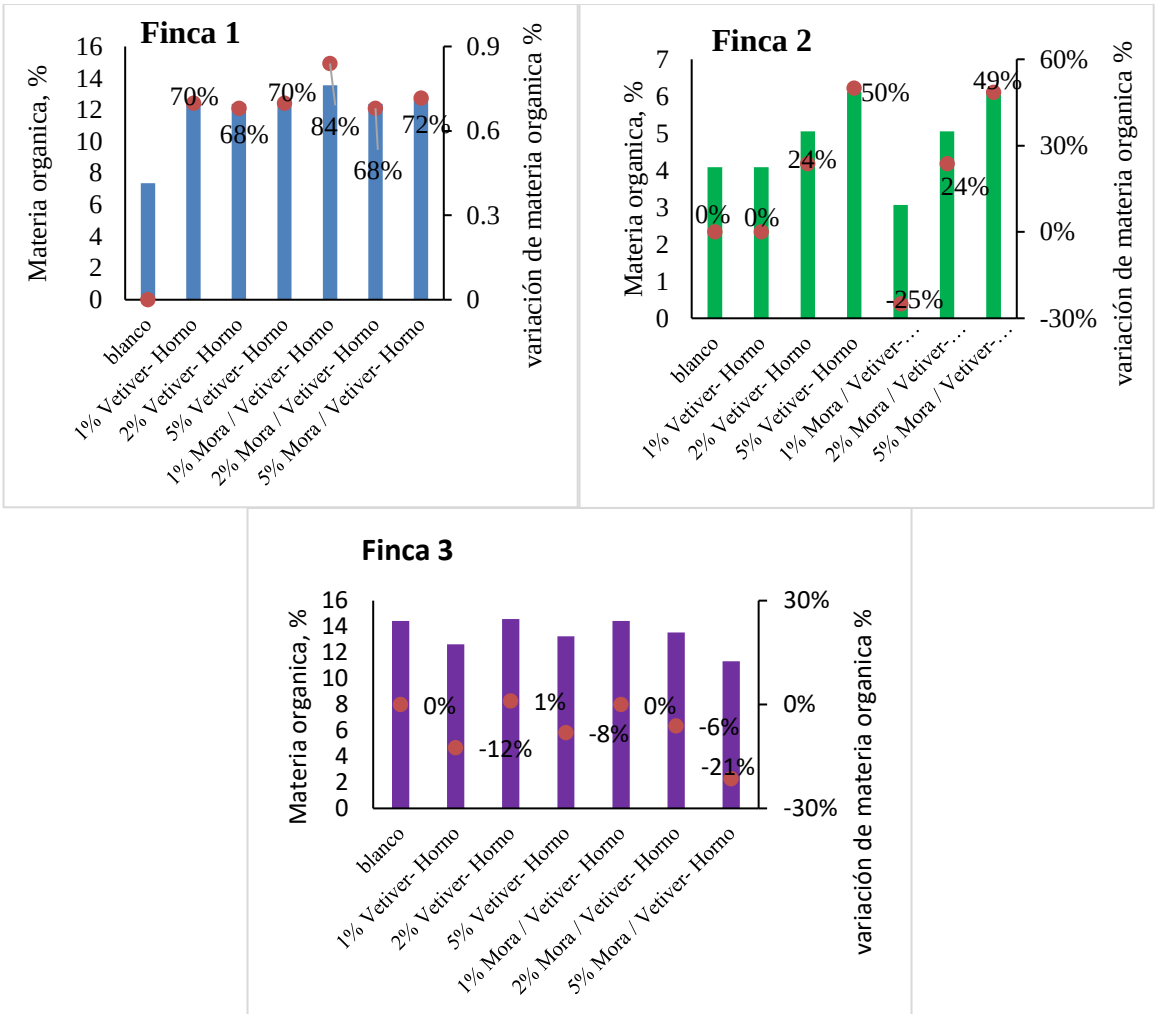
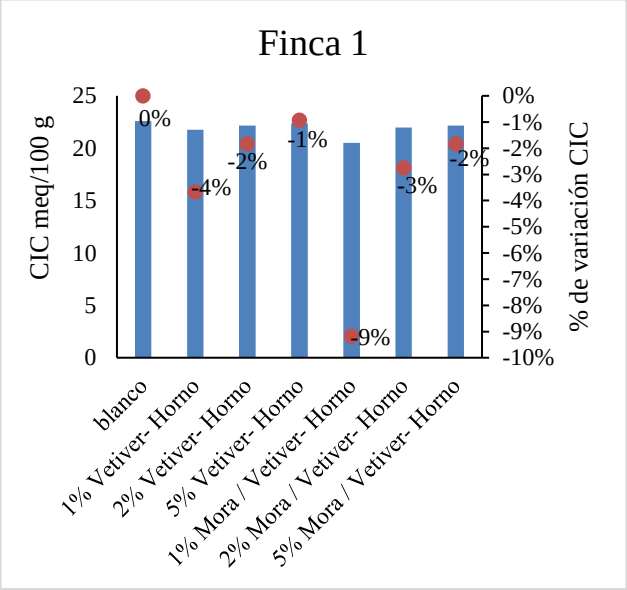
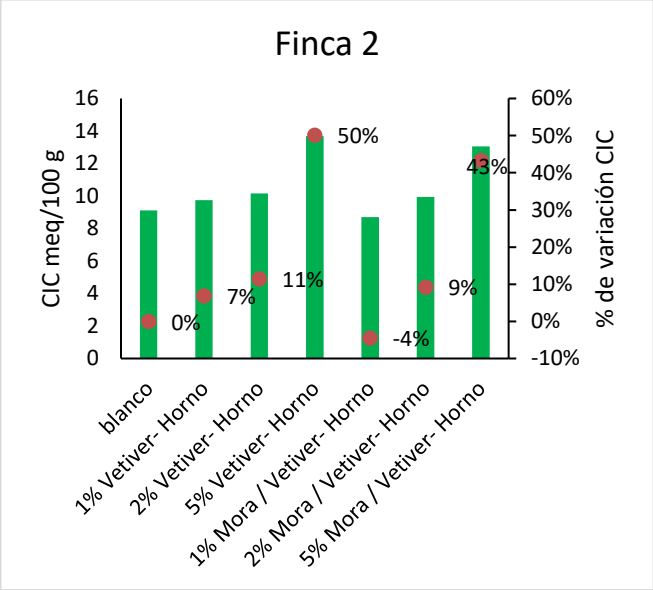


Figura 2. Porcentaje de materia orgánica para diferentes matrices de los suelos de las Fincas: No 1 , No 2 y No 3 a diferentes concentraciones de nano fertilizantes sintetizados por química verde.





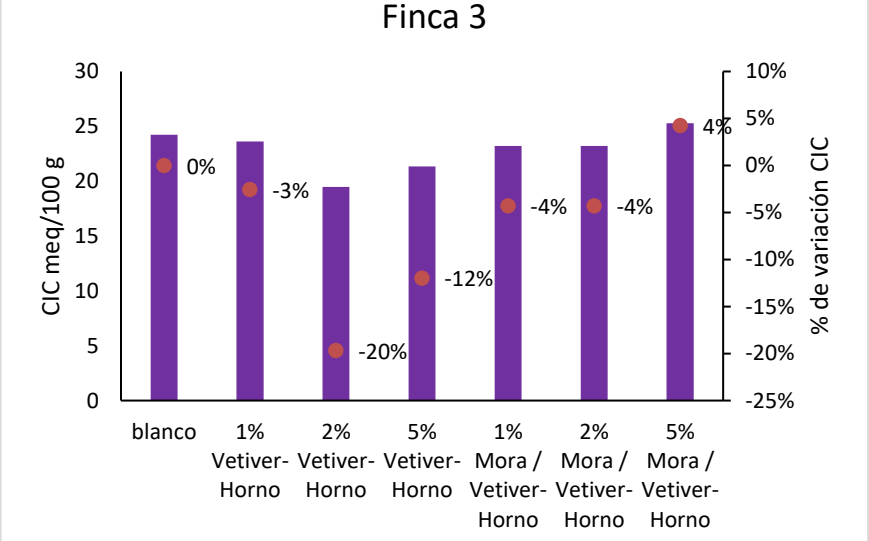


Figura 3. Intercambio Catiónico para diferentes matrices de los suelos de las Fincas: No 1, No 2 y No 3 a diferentes concentraciones de nano fertilizantes sintetizados por química verde.

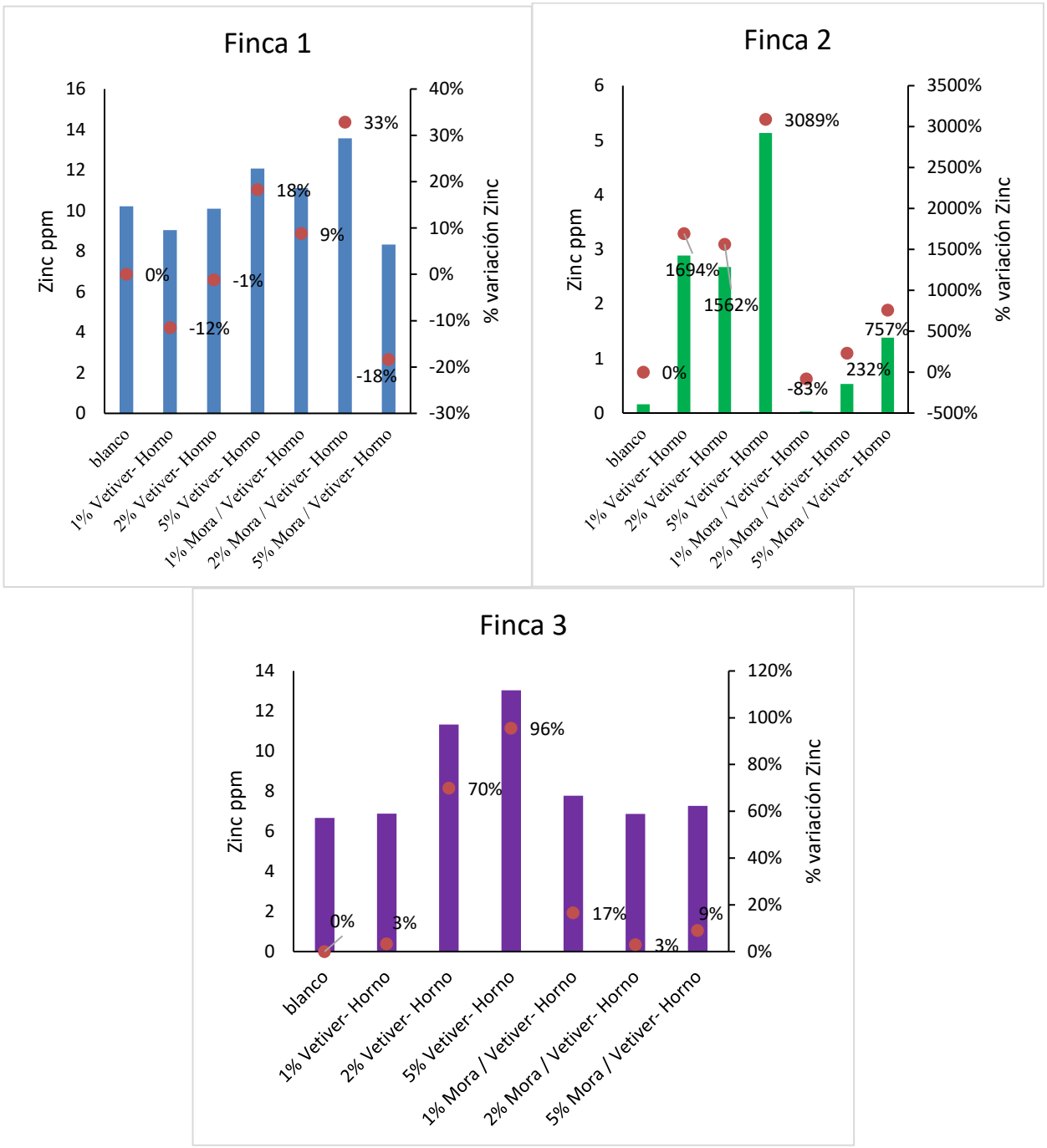


Figura 4. Zinc las diferentes matrices de los suelos de las Fincas: No 1, No 2 y No 3 a diferentes concentraciones de nano fertilizantes sintetizados por química verde.

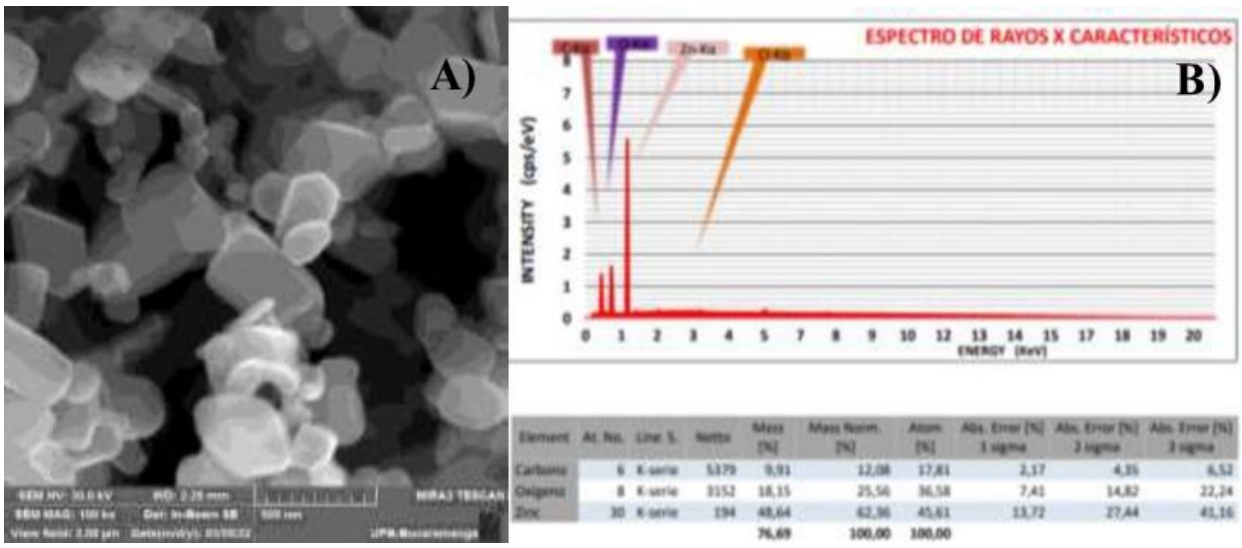


Figura 5, a) Micrografía SEM de nanopartículas ZnO sintetizadas; b) EDS de las nanopartículas de ZnO sintetizadas

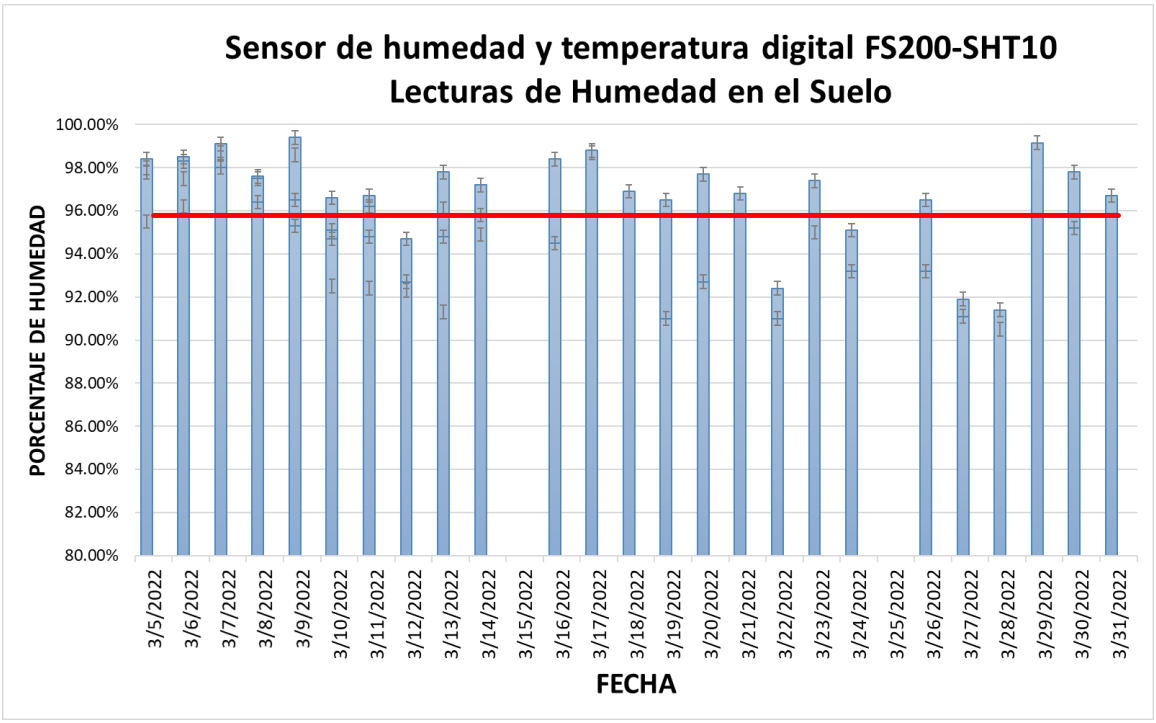


Figura 6, Mediciones de Humedad del Sensor en una de las plantas de la Huerta.

ACODAL
ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
65° CONGRESO INTERNACIONAL
Agua, Saneamiento, Ambiente y Energías Renovables
Bogotá - Colombia
Centro de Convenciones Ágora
Julio 13, 14 y 15 de 2022

Implementación del sistema de recolección de lluvia horizontal para la mejora de la oferta hídrica en la zona alta de la vereda sabaneta del municipio de San Francisco, Cundinamarca

Víctor Leonardo López Jiménez[1*], Erika de Dios Martínez Parra2, Pedro Nicolás Prieto Quiroga3

[1] Meteorólogo, MsC Desarrollo Ambiental. Docente Universidad de La Salle
[2] Ingeniera Ambiental y Sanitaria. Universidad de La Salle
[3] Ingeniero Ambiental y Sanitario. Universidad de La Sale
**Autor corresponsal:* [1] Universidad de la Salle. Email: vlopez@unisalle.edu.co

Abstract

One of the biggest challenges for communities in rural areas is the access to water resources, in addition to ensuring that this is in the quality and quantity necessary to supply the different activities that are carried out on a daily basis. There are different methods of capturing and distributing the water resource that can be implemented to improve its availability. The objective of this research work is to carry out the design of a horizontal rain collection system that contributes to the improvement of the water supply in the upper area of the Sabaneta pathway in the municipality of San Francisco, Cundinamarca. In response to the research question, were proposed four phases for the methodological development, in which a series of activities were carried out; the diagnosis of the area to be intervened was advanced; After the analysis of the physical-geographical components of the area, the horizontal rain collection element was built, studying the feasibility for the construction of the system according to the weather conditions (favorable) for its operation; later; in the construction, the proper tests were maked with pilot installations, in order to reach the final assembly, which was carried out after permanent monitoring, which will prolong the performance of the horizontal rain collection system (fog catcher); it was possible to establish that, in this system, 0.16 L/m2-day could be captured, an amount that is not enough to cover the demand for the resource for the people who habit the Finca Lucitania, where the construction of the final assembly was carried out. , for which the design of a complementary system was proposed*.*

KeyWords : Fog catcher, Horizontal rainfall, Water availability, Water quality.

ACODAL
ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
65° CONGRESO INTERNACIONAL
Agua, Saneamiento, Ambiente y Energías Renovables
Bogotá - Colombia
Centro de Convenciones Ágora
Julio 13, 14 y 15 de 2022

IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE LLUVIA HORIZONTAL PARA LA MEJORA DE LA OFERTA HÍDRICA EN LA ZONA ALTA DE LA VEREDA SABANETA DEL MUNICIPIO DE SAN FRANCISCO, CUNDINAMARCA

Resumen

Uno de los retos más grandes para las comunidades que se encuentran en áreas rurales es el acceso al recurso hídrico, sumado al de velar porque este se encuentre en la calidad y cantidad necesarias para abastecer las diferentes actividades que se realizan a diario. Existen distintos métodos de captación y distribución del recurso hídrico que se pueden implementar para mejorar su disponibilidad. El objetivo de este trabajo de investigación es realizar el diseño de un sistema de recolección de lluvia horizontal que contribuya al mejoramiento de la oferta hídrica en la zona alta de la vereda Sabaneta del municipio de San Francisco, Cundinamarca. Dando respuesta a la pregunta de investigación, se plantearon cuatro fases para el desarrollo metodológico, en las que se llevaron a cabo una serie de actividades; se adelantó el diagnóstico del área a intervenir; luego del análisis de las componentes físico-geográficas del área, se diseñó el elemento de recolección de lluvia horizontal, estudiando la viabilidad para la construcción del sistema de acuerdo con las condiciones climatológicas para el funcionamiento del mismo; luego, en la construcción se realizaron las debidas pruebas con instalaciones piloto, para llegar al montaje final, el cual se llevó a cabo luego de un seguimiento permanente, con lo que se determinó el desempeño del sistema de recolección de lluvia horizontal (atrapanieblas); se pudo establecer que, en este sistema podrían captarse 0.16 L/m2-día., cantidad que no alcanza a cubrir la demanda del recurso para las personas que habitan el predio de la Finca Lusitania, donde se realizó la construcción del montaje final, por lo que se planteó el diseño de un sistema complementario.

Palabras clave: Atrapanieblas, Calidad del agua, Disponibilidad hídrica, Lluvia horizontal.

Introducción

El agua es un recurso fundamental para el desarrollo socioeconómico y ambientalmente sostenible de una región y la disponibilidad de este recurso es parte crucial de la adaptación al cambio climático. De otro lado, se considera que el recurso hídrico es de una alta importancia, en la relación que existe entre la sociedad y el medio ambiente.

El agua es considerada, además, un derecho fundamental. A medida que crece la población mundial surge la necesidad creciente de conciliar la competencia entre las demandas comerciales de los recursos hídricos para que las comunidades tengan lo suficiente para satisfacer sus necesidades. El desarrollo del ser humano requiere que el agua y los sistemas de saneamiento no se lleven a cabo de forma separada. Ambos son vitales para reducir el número de enfermedades y para mejorar la salud, la educación y la productividad económica de las poblaciones. (Naciones Unidas, 2020)

Dentro de los eventos destacados en relación con el recurso hídrico, la Asamblea General de las Naciones Unidas del derecho al agua y al saneamiento, reconoció el derecho que posee cada ser humano de acceder a una cantidad de agua suficiente para uso doméstico y personal, que se debe encontrar entre los 50 y 100 litros por persona al día, y que este recurso debe estar en una condición segura, aceptable y asequible , además que el costo por este recurso no debe superar el 3% de los ingresos del hogar, la fuente no debe estar a menos de 1000 metros y su recogida no debe superar los 30 minutos. (Naciones Unidas, 2020)

Se debe tener en cuenta que el agua disponible debe ser aprovechada inmediatamente o almacenada para su posterior uso, pues esta seguirá fluyendo fuera de las zonas de interés o alcance de la comunidad (vivienda, familia, cultivo, establo, parcela) y pasará a otras fases siguiendo el ciclo hidrológico. (FAO, 2013)

Métodos de captación

Captación de techos

Esta modalidad está dirigida a la captación y aprovechamiento de aguas lluvias, ésta consiste en captar de superficies impermeables o poco permeables como los techos de las viviendas, establos, patios, superficies rocosas, plásticos, la escorrentía para así almacenarla y manejarla en diferentes usos domésticos (FAO, 2013).

Derivación de manantiales

Este tipo de captación no es considerada propiamente de captación de aguas lluvia, sin embargo, esta técnica de captación y derivación de manantiales y cursos de agua definidos es útil para contrarrestar el déficit hídrico en determinadas zonas, el uso de este recurso tiene finalidades como riego, abrevadero y hasta consumo doméstico, teniendo en cuenta la calidad del recurso (FAO, 2013).

Micro captación

En esta técnica se capta la escorrentía superficial generada dentro del propio terreno, o en áreas continuas al mismo, para hacer infiltrar y que ésta sea aprovechada por los cultivos, esta técnica utiliza propiedades hidrológicas de un área con pendiente, lisa, poco permeable y sin vegetación (FAO, 2013).

Captación de niebla

Existen lugares en donde las condiciones climáticas y orográficas, son compatibles para realizar la captura y aprovechamiento de la humedad atmosférica que se desplaza sobre la superficie en forma de niebla (FAO, 2013).

Sistema de Recolección de Lluvia Horizontal (Atrapanieblas)

Un sistema de aprovechamiento de agua con base en lluvia horizontal, el cual consiste en el aprovechamiento de las diminutas gotas de agua que permanecen en el aire, las cuales no tienen el tamaño suficiente para precipitarse (de 1-40 µm), por esto pueden pasar casi desapercibidas, y aún no es valorado suficientemente su potencial (Mendoza & Castañeda, 2014)

En los trabajos que se han adelantado al respecto, lo que se plantea es la instalación de un obstáculo, la malla que se comporta como una superficie que soporta la embestida del viento, permitiendo la condensación de las gotas de vapor sobre la malla que operara como núcleo de condensación. Las gotas producto de la condensación, descienden sobre la superficie de la malla hasta un canal que las direcciona al sitio de almacenamiento, que puede ser un tanque de reserva construido o de los que se consiguen genéricos en el mercado, dependiendo del tamaño de almacenamiento y del presupuesto (Mendoza & Castañeda, 2014)

El principio de funcionamiento del dispositivo de recolección de lluvia horizontal se basa en la ubicación de un obstáculo al paso del viento cargado de humedad, este obstáculo debe tener un porcentaje de apertura, es decir el obstáculo debe permitir el paso del viento, pero debe tener un porcentaje de retención de modo que este pueda tomar parte de la humedad; en caso de que se use una malla tipo Raschel ésta debe tener un porcentaje medio de paso de luz, con el fin de que los filamentos no estén tan separados entre sí y de esta forma las micro gotas sean retenidas por la malla, en caso de ser implementada una malla metálica esta debe tener un número Mesh entre 60 y 100, el número Mesh hace referencia al número de orificios por pulgada lineal, estos tipos de malla son eficientes para realizar la recolección de las microgotas que son transportadas en la neblina, pero su porcentaje de eficiencia dependerá de su porcentaje de paso de luz relacionado directamente con el número Mesh.

Disponibilidad del recurso hídrico en el área de estudio

En nuestro país se ve reflejada esta situación en donde a las personas de las áreas rurales se le dificulta el acceso a este recurso vital, aun cuando existen normas y leyes que regulan su uso y aprovechamiento. El Municipio de San Francisco de Sales pertenece a la provincia del Gualivá del departamento de Cundinamarca, ocupando una extensión de 118.2 Km2. Limita al norte con los Municipios de La Vega y Supatá, al oriente con Subachoque y El Rosal, al occidente con La Vega y al sur con el Municipio de Facatativá.

Según los datos registrados por el DANE de las condiciones generales en las viviendas en la vereda Sabaneta, la particularidad es la falta o insuficiencia en la prestación de los servicios básicos de energía eléctrica, agua y alcantarillado, en donde el servicio de mayor cobertura es la energía eléctrica que llega a 258 viviendas y solo 13 no cuentan con esta; seguida del servicio de acueducto con el que cuentan 50 viviendas, mientras que 248 no tienen acceso a este; y por último la ausencia del servicio de alcantarillado, que no está disponible para ninguna de las 295 viviendas de la vereda. (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, 2014)

Por otro lado, la prestación de los servicios de Alcantarillado y Aseo es prestada directamente por la Empresa de servicios públicos de San Francisco, el cual es el operador de estos dos servicios públicos, con una cobertura en aseo de 1.500 usuarios y en alcantarillado de 700 usuarios, con un porcentaje de 65 al 70% de la población que puede acceder a los servicios. (Concejo Municipal de San Francisco Cundinamarca, 2016)

La vereda Sabaneta, que tiene terreno en la zona más alta del municipio de San Francisco, Cundinamarca, alcanzando una altitud que supera los 3000 msnm tiene una comunidad vulnerable, debido a que no cuentan con un servicio de agua constante en la zona; por esta razón, el agua debe ser llevada por un sistema de bombeo a cada una de las viviendas que conforman este sector de Sabaneta Alta, lo que genera un costo energético alto, por lo que sólo cuentan con el servicio de agua 3 días a la semana en ciertos horarios establecidos.

Las condiciones de calidad del agua son inciertas, en el sector no se cuenta con abastecimiento de agua potable, puesto que el acueducto del cual se abastecen no tiene una planta o sistema de tratamiento que garantice las condiciones óptimas de calidad de agua apta para el consumo humano; no existe ningún sistema que permita la potabilización y se puede decir que el agua llega a cada uno de los usuarios en similares condiciones del punto de captación.

Debido a esto, varios usuarios de este acueducto han buscado distintas alternativas para que la principal dificultad de este terreno se convierta en su primer aliado, considerando que esta zona al ser tan elevada cuenta con un gran porcentaje de humedad; esta población se encuentra en busca de alternativas debido a la escases de agua segura y potable, esto da vía libre a varias opciones debido a los factores climáticos que presenta esta zona como son; temperatura media anual la cual no es muy variable ya que oscila entre 12,4 °C y 14,8° C, con valores bajos en la madrugada que facilitan la condensación de las gotitas de vapor suspendidas en el aire; una precipitación con un promedio anual de 1442,8 mm; la humedad relativa, en términos generales, oscila entre el 82% y el 88% y los datos de brillo solar arrojados por la estación Sabaneta muestran que el mes con mayores horas de insolación es agosto con 138,9 horas, después se tiene meses como enero, septiembre y julio con 128,1; 126,6 y 125,0 horas de insolación respectivamente.

De las problemáticas identificadas en la vereda Sabaneta se encuentra la escasez de agua, siembra de eucalipto, afectación de nacimientos por construcción de doble calzada, tala indiscriminada de bosques, desperdicio del agua, deterioro de vías internas por falta de infraestructura y contaminación de aguas por ganadería (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, 2014). La mayoría de estas condiciones se pueden relacionar con el deterioro en la disponibilidad del recurso hídrico, de ahí la importancia de implementar nuevas medidas para la obtención de este recurso valioso.

Es claro, entonces, que para atender la problemática que presenta la disponibilidad del recurso hídrico en la vereda Sabaneta, se necesitan nuevas alternativas para la obtención del recurso hídrico, además, se requiere que el recurso disponible mejore, en calidad y cantidad con miras a que se cubra la demanda de los pobladores de la vereda en ~~de~~ la totalidad de las actividades diarias, tanto para el uso doméstico, como para el uso comercial; estas alternativas se deben garantizar para el crecimiento y desarrollo de la región.

Para dar solución a esta problemática se planteó el diseño de un sistema de recolección de lluvia horizontal (atrapamiento de la humedad contenida en el aire) que contribuya al mejoramiento de la oferta hídrica en la zona alta de la vereda Sabaneta del municipio de San Francisco, siguiendo los objetivos específicos de establecer la disponibilidad actual del recurso hídrico y evaluar la calidad del agua procedente de las fuentes de donde se abastecen los acueductos de la zona alta de la vereda Sabaneta, tomando como referencia lo descrito en la Resolución 2115 de 2007. Para esto se llevó a cabo el diseño del sistema que condujera a la recolección de lluvia horizontal como una alternativa para el mejoramiento de la oferta hídrica en la zona alta de la vereda. Al final se evaluaron los beneficios de la instalación del sistema de recolección (atrapa-nieblas) en un predio de la zona de estudio.

Material y método (metodología);

Con el fin de alcanzar los objetivos propuestos el proyecto se dividió en cuatro fases

Fase 1. Diagnóstico

Esta fase permitió identificar el estado actual de la Vereda Sabaneta, determinando los componentes abióticos, bióticos, socioeconómicos, culturales y políticos, utilizando métodos estratégicos de recopilación de información (de primera y segunda mano), que sirvieran de base para establecer las condiciones actuales de la Vereda, observando sus potencialidades, conflictos, límites y condiciones ambientales.

Actividad 1: Identificación y reconocimiento de la Vereda Sabaneta.
Actividad 2: Desarrollo de la línea base y determinación de las áreas de influencia.
Actividad 3: Visita a los puntos identificados para la recolección de muestras en la vereda Sabaneta.
Actividad 4: Análisis respectivo de la calidad del recurso hídrico en la Vereda.
Actividad 5: Obtención de información meteorológica, hidrográfica e hidrológica de la zona de influencia para la realización del balance hídrico

Fase 2: Análisis y diseño

Esta fase comprende las estrategias, las medidas para la administración del recurso hídrico, elaboración de diseños para la recolección, aprovechamiento efectivo del agua y técnicas que fortalecen los conocimientos ambientales a la comunidad.

Actividad 6: Identificación de fortalezas y debilidades entorno a la disponibilidad del recurso hídrico
Actividad 7: Identificación y evaluación de impactos ambientales referentes al área de influencia.
Actividad 8: Análisis meteorológico para la determinación de la viabilidad para la implementación de los sistemas de recolección de lluvia horizontal (atrapanieblas) en la Vereda Sabaneta.
Actividad 9: Diseño y desarrollo del manual de construcción de los sistemas de recolección de lluvia horizontal (atrapanieblas).
Actividad 10: Identificación de los puntos estratégicos para la construcción de los sistemas de recolección de lluvia horizontal.
Actividad 11: Realización del montaje piloto y básico de un atrapanieblas, con el fin de identificar fallas y/o posibles oportunidades de mejora.

Fase 3: Ejecución

Esta fase permitió aplicar los instrumentos y las estrategias desarrolladas en las anteriores fases; en ésta se llevó a cabo el montaje final con el acompañamiento de la comunidad.

Actividad 12: Adquisición de los materiales necesarios para la construcción de los sistemas de recolección de lluvia horizontal (atrapanieblas), en conjunto con la comunidad.
Actividad 13: Construcción de los sistemas de recolección de lluvia horizontal (atrapanieblas), en los puntos estratégicos.

Fase 4: Seguimiento y Control

Esta fase corresponde a la aplicación de mecanismos definidos en el respectivo plan de seguimiento, se verificó la eficiencia y efectividad de las estrategias implementadas, realizando el respectivo análisis de los resultados finales del proyecto.

Actividad 14: Evaluación de desempeño de los sistemas de recolección de lluvia horizontal (atrapanieblas) m3/m2*día.
Actividad 15: Análisis respectivo de la calidad del recurso (muestra atrapanieblas).
Actividad 16: Evaluación de mejora de la disponibilidad del recurso en la zona.
Actividad 17: Recopilación de resultados y conclusiones.

Resultados y discusión

Recolección y Análisis de muestras

Para el análisis de calidad del recurso hídrico disponible en la vereda Sabaneta, se llevó a cabo la toma de 3 muestras con fin de realizar los respectivos laboratorios de evaluación de parámetros fisicoquímicos, en donde se realizaron pruebas de Turbiedad, pH, Alcalinidad, Fosfatos, Manganeso, Molibdeno, Zinc, Dureza, Sulfatos, Hierro, Nitratos, Nitritos, Aluminio, Fluoruros, COT, Coliformes Totales y Escherichia Coli (tabla 1); las muestras fueron tomadas de los puntos de abastecimiento de agua disponibles para la comunidad en la vereda. El primer punto de recolección de muestras corresponde a un nacedero que abastece a varias familias de esta zona, el segundo punto corresponde a un nacedero del cual el acueducto capta agua para distribuir a varias casas de la vereda y el último punto en la vivienda de la Finca Lusitania, la cual es abastecida por el acueducto.

Tabla 1. Resultados análisis de muestras en laboratorio.

PARÁMETROS	PUNTAJE DE RIESGO	MÁXIMO	UNIDADES	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3	PUNTAJE MUESTRA 1	PUNTAJE MUESTRA 2	PUNTAJE MUESTRA 3
Turbiedad	15	2 UNT	UNT	0.64	4.05	1.77	0	15	0
pH	1.5	6.5 a 9	-	4.48	4.59	5.03	1.5	1.5	1.5
Alcalinidad Total	1	200 mg/L	mg/L CaCO3	9.3	10.7	3.8	0	0	0
Fosfatos	1	0.5 mg/L	mg/L PO4	0.83	1.16	0.63	1	1	1
Manganeso	1	0.1 mg/L	mg/L Mn	1	0.5	0.1	1	1	0
Molibdeno	1	0.07 mg/L	mg/L Mo	1.7	4.5	3.6	1	1	1
Zinc	1	3 mg/L	mg/L Zinc	0.06	0.07	0.01	0	0	0
Dureza Total	1	300 mg/L	mg/L CaCO3	-	13.1	9.7	-	0	0
Sulfatos	1	250 mg/L	mg/L SO4	28	0	1	0	0	0
Hierro total	1.5	0.3 mg/L	mg/L Fe	0.21	0	0	0	0	0
Nitratos	1	10 mg/L	mg/L NO3	0.01	0.01	0.02	0	0	0
Nitritos	3	0.1 mg/L	mg/L NO2	0	0	0	0	0	0
Aluminio	3	0.2 mg/L	mg/L Al	0.057	0.131	0.16	0	0	0
Fluoruros	1	1 mg/L	mg/L F	0.1	0.1	0.1	0	0	0
COT	3	5 mg/L	mg/L COT	-	-	4.8	-	-	0
Coliformes Totales>CC	15	Existen	-	Existen	Existen	Existen	15	15	15
Escherichia Coli	25	Existen	-	Existen	Existen	Existen	25	25	25
			TOTAL				46	61	45
			PORCENTAJE IRCA %				58.6	78.3	57.2

Según los términos establecidos en la resolución 2115 del 2007 en el artículo 15° "Clasificación del nivel del riesgo" se obtienen los criterios de clasificación para el agua en cuanto al riesgo que representa; teniendo en cuenta estos términos y poniéndolos frente a los valores obtenidos de los análisis realizados a las tres muestras recolectadas en distintos puntos, se pudo determinar que dos de estas muestras de agua se encuentran catalogadas en un riesgo alto, y la tercera se encuentra catalogada como inviable sanitariamente.

Teniendo en cuenta que esta zona no cuenta con ningún tipo de sistema o planta de tratamiento de agua potable y no está en sus planes implementar una, se estima que estos parámetros permanecerán con valores similares a los actuales y del mismo modo la población se seguirá abasteciendo con agua catalogada en riesgo alto o inviable sanitariamente. Debido a que la comunidad utiliza este recurso en actividades relacionadas con la alimentación, se están exponiendo a sufrir afectaciones en su salud.

Balance Hídrico

El balance hídrico fue empleado para el cálculo de la oferta hídrica, que equivale a un volumen de agua en un periodo determinado. Esta ecuación está referida al cálculo de entradas y salidas de agua durante un periodo de tiempo, teniendo en cuenta los almacenamientos de cada uno de estos periodos. Para el desarrollo del balance hídrico, se observó e investigó también el caudal, el cambio de almacenamiento de la zona de estudio. En el cálculo se tiene en cuenta la siguiente ecuación: Precipitación + Q. Entrada = Escorrentía Superficial + Salida + Evapotranspiración

Tabla 2. Balance Hídrico.

Balance Hídrico	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
ETP	62.31	67.25	71.87	74.75	73.00	71.95	67.65	70.45	72.83	70.93	64.71	62.01
Precipitación	129.5	127.3	207.3	134.4	95.8	51.7	57.4	56.2	64.6	162	209.5	147
Precipitación útil	67.19	60.05	135.43	59.65	22.80	-20.25	-10.25	-14.25	-8.23	91.07	144.79	84.99
Reserva	67.19	120	120	120	120	99.75	89.50	75.25	67.02	120	120	120
Excedente		7.25	135.43	59.63	22.8	0	0	0	0	38.09	144.79	84.99
Déficit	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Etp Real	62.31	67.25	71.87	74.75	73.00	71.95	67.65	70.45	72.83	70.93	64.71	62.01

Para la elaboración del balance hídrico se tuvieron en cuenta los totales medios de precipitación, ya que con estos datos se puede estimar la entrada y salida del recurso hídrico en la cuenca hidrográfica. Se seleccionaron las estaciones de mayor cercanía o pertenecientes a la cuenca hidrográfica y cuantificar y registrar la temporalidad de la zona en el transcurso de un año. Las estaciones cercanas son la estación El Corazón y la estación El Rosal, y la perteneciente a la cuenca es la estación de Sabaneta.

La evapotranspiración es un factor importante para el déficit de escorrentía, ya que, puede llegar a afectar el ciclo hidrológico presente en la cuenca hidrográfica, algunos factores que intervienen en el proceso de evapotranspiración es el brillo solar, que para el área de estudio presenta sus valores pico en el mes de enero y agosto aportando una mayor energía al proceso, provocando que el agua se evapore en un menor tiempo.

Otro de los factores que influyen en la evapotranspiración es la humedad relativa, ésta tiene un efecto inverso al de la radiación solar; la humedad relativa en la zona es homogénea con un valor promedio de 85% en el transcurso del año, lo que provoca que exista una gran cantidad de vapor en la atmósfera reduciendo los valores de la evaporación.

Durante los meses de mayor radiación el valor de la evapotranspiración está en el rango de 70-75 milímetros; es importante resaltar que, durante los meses de junio, julio, agosto y septiembre el valor de evapotranspiración es mayor que el de la precipitación lo que genera un déficit, es decir, el agotando del almacenamiento o reserva. Dentro de los análisis el factor más importante a resaltar es el del déficit, como se evidencia en la Tabla 2 los valores para permanecen en 0, lo que quiere decir que en ninguna época del año hay escasez del recurso hídrico en la zona de estudio.

Impactos Ambientales

Al realizar la correspondiente evaluación de impacto ambiental según los términos establecidos en el “instructivo de diligenciamiento de la Matriz de Identificación de Aspectos y Valoración de Impactos Ambientales” se destacan los siguientes: posible molestia a los habitantes de la vereda, incremento en la oferta hídrica presente en la vereda y visualización de un elemento utópico en el entorno. Dos de los anteriores tienen una valoración negativa, los tres señalados se encuentran dentro del rango de importancia baja y es para resaltar que los valores de los impactos negativos son de menor magnitud; posible molestia (5), visualización de un elemento utópico (2100), incremento en la oferta hídrica (6480), se evidencia que los impactos negativos son muy poco representativos frente a los positivos, en conclusión, se puede afirmar que el impacto de este proyecto es positivo.

Diseño y construcción sistema de recolección lluvia horizontal (Atrapanieblas)

Para la selección del diseño del atrapanieblas, se tuvo en cuenta la investigación realizada en la fase de diagnóstico en donde se determinaron las características que hacen que un diseño sea más productivo que otro. Se encontró que las variables que determinan una mayor productividad se relacionan con la estructura y el material que será objeto de captación en dicho sistema.

En el momento de la selección se tuvieron en cuenta 2 factores principales sobre los demás, costo y desempeño, si se observan la línea base y las direcciones que predominan en el recorrido del viento se puede observar que son sólo dos direcciones, las cuales tienen una magnitud importante; ya que estas corrientes siguen la misma ruta pero con distinta dirección se puede asumir que no es necesaria la implementación de más de una cara en el dispositivo ya que el desempeño no va a crecer sustancialmente pero los costos si se verían afectados de forma apreciable, debido a esto se decidió usar la estructura que solo tenía una cara.

Para la realización de las pruebas piloto, nos centramos en 4 mallas diferentes, tres de estas mallas son de acero inoxidable las cuales se diferencian entre sí por el número, en este caso serán puestas a prueba las mallas de 60, 80 y 100 con el objetivo de comparar cual presenta un mejor desempeño en cuanto a recolección, la otra opción a analizar es la malla Raschel mejor conocida como Polisombra el cual es un material más económico y del cual ya hay bastantes datos relacionados con el atrapamiento de la lluvia horizontal.

Al momento de realizar las pruebas piloto con las distintas mallas se tomaron sistemas de recolección independientes, de los cuales cada uno tenía instalado un tipo de malla distinta de un área de un metro cuadrado; se pudieron apreciar varios factores importantes de cada una de las mallas

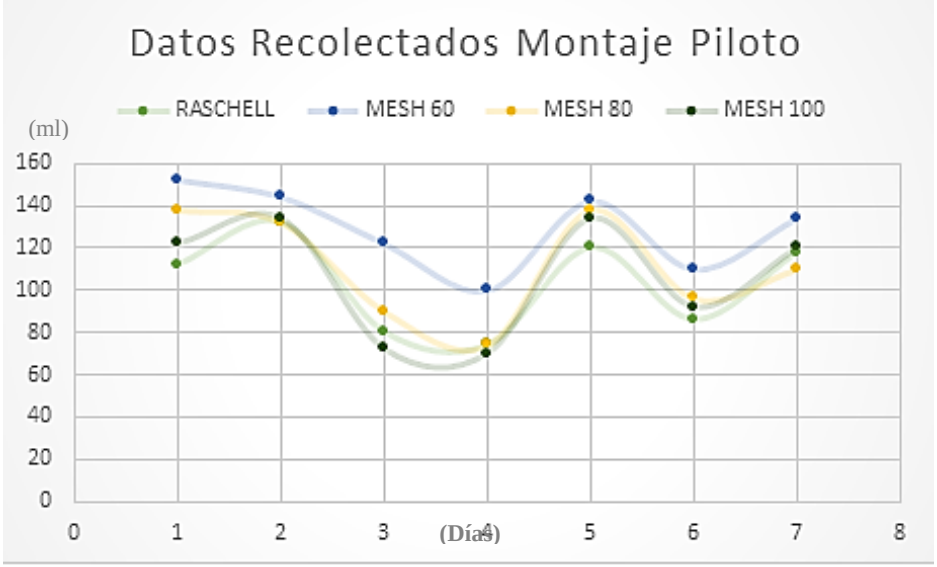


Figura 1. Datos recolección montaje piloto.

Teniendo en cuenta características fundamentales como los son desempeño y costo se decidió implementar en el montaje final de recolección de lluvia horizontal la maya Mesh 60. Del se obtiene un desempeño de 0.16 L/m^2 día

Figura 2. Montaje final sistema de recolección lluvia horizontal (atrapanieblas)

Para medir la calidad del agua proveniente del sistema de recolección de lluvia horizontal se tomó una muestra, la cual fue sometida a los mismos análisis de laboratorio que se realizaron previamente a las distintas muestras provenientes de las fuentes de abastecimiento de la comunidad, específicamente del predio Finca Lucitania. En la Tabla 3 se consignan los resultados de los parámetros analizados

Tabla 3. Resultado de análisis de laboratorio muestra atrapanieblas.

PARÁMETROS	PUNTAJE DE RIESGO	MÁXIMO	UNIDADES	MUESTRA 1	PUNTAJE MUESTRA 1
Turbiedad	15	2 UNT	UNT	0,72	0
pH	1,5	6,5 a 9	-	7,29	0
Alcalinidad Total	1	200 mg/L	mg/L CaCO3	10,2	0
Fosfatos	1	0,5 mg/L	mg/L PO4	0,2	0
Manganeso	1	0,1 mg/L	mg/L Mn	0,2	1
Molibdeno	1	0,07 mg/L	mg/L Mo	2,4	1
Zinc	1	3 mg/L	mg/L Zinc	0,14	0
Dureza Total	1	300 mg/L	mg/L CaCO3	16,3	0
Sulfatos	1	250 mg/L	mg/L SO4	4	0
Hierro total	1,5	0,3 mg/L	mg/L Fe	0,03	0
Nitratos	1	10 mg/L	mg/L NO3	2,5	0
Nitritos	3	0,1 mg/L	mg/L NO2	0	0
Aluminio	3	0,2 mg/L	mg/L Al	0,24	3
Fluoruros	1	1 mg/L	mg/L F	0,2	0
COT	3	5 mg/L	mg/L COT	4,5	0
Coliformes Totales>CC	15	Existen	-	No Existen	0
Escherichia Coli	25	Existen	-	No Existen	0
		TOTAL			5
		PORCENTAJE IRCA %			6,58

El análisis se realiza teniendo en cuenta los términos establecidos en la resolución 2115 del 2007 en el artículo 15° “Clasificación del nivel del riesgo”. De esta manera comparando los términos frente a los resultados obtenidos de los análisis realizados a la muestra proveniente del dispositivo de recolección de lluvia horizontal, se pudo determinar que ésta muestra de agua se encuentra catalogada en un riesgo bajo, debido a que ciertos parámetros superan los rangos permitidos como son; manganeso, aluminio y molibdeno.

Cabe tener en cuenta que los parámetros que superan los límites no tienen gran inconveniente para ser retirados del agua por medio de filtración con carbón activado, de esta forma se pueden retirar los excesos en las concentraciones, que hacen que esta agua se catalogada como de riesgo bajo y hacer que sea considerada como sin riesgo y que sea apta para el consumo humano, de esta forma la población que implemente este sistema contará con un recurso hídrico de calidad y que se podría consumir sin ningún tipo de riesgo.

Conclusiones

Se logró establecer la disponibilidad del recurso hídrico en la vereda Sabaneta, por medio del balance hídrico, en donde se obtuvo como resultado que en ninguna época o mes del año el sistema se queda sin almacenamiento del recurso lo que se traduce en que no hay déficit de éste en la zona.

Se realizó el laboratorio para el análisis de la calidad de agua proveniente de distintas fuentes en la zona, encontrando que la calidad del recurso según lo establecido en la CLASIFICACIÓN DEL NIVEL DEL RIESGO - IRCA establecida en la Resolución 2115 de 2007 se encuentra dentro del nivel de riesgo alto, al contener en todas las muestras coliformes y la bacteria Escherichia Coli aportando 15 y 25 puntos respectivamente a la totalidad de puntos calificados en el IRCA, lo que hace al agua proveniente de estas fuentes, no apta para el consumo humano.

Los análisis de laboratorio realizados a las muestras de lluvia horizontal, arrojaron como resultado que ésta agua se encuentra catalogada por el IRCA como un agua de riesgo bajo debido a la presencia de metales como manganeso, molibdeno y aluminio. De otro lado, se pudo establecer que–la calidad del agua obtenida en el sistema instalado cambia drásticamente con relación a la que se toma en puntos de los cuales la población se abastece, los cuales están catalogadas como de riesgo alto o inviables sanitariamente.

Tomando como referencia los resultados obtenidos y buscando mejorar la calidad del agua disponible para la comunidad y su uso en las diferentes actividades realizadas diariamente en la zona, se logró el diseño del sistema de recolección de lluvia horizontal (atrapanieblas), una estructura bidimensional que utiliza la malla Mesh 60 como el elemento de barrera en donde se condensa y precipita el agua proveniente de la neblina.

La instalación de este sistema aporta a la comunidad una nueva fuente del recurso hídrico con un desempeño de 0,16 L/m2-dia. En la Finca Lucitania, predio donde se realizó el montaje final del sistema de recolección de lluvia horizontal (atrapanieblas), con la instalación de 8m2 de malla se logró una captación promedio de 1,35 L de agua diarios.

La comunidad manifestó que a pesar de que la recolección es poca, este recurso fue muy útil para desempeñar actividades de apicultura, donde se necesita un recurso de buena calidad, la comunidad se mostró conforme ya que esto hace parte de los ingresos de los que ellos subsisten.

Para lograr el aumento deseado en la cantidad de recurso disponible para la comunidad, llevó a cabo el diseño de un sistema complementario, basado en la recolección de agua lluvia, que funciona captando el líquido proveniente de las precipitaciones de la zona en los techos de las viviendas. Este sistema diseñado teóricamente lograría captar del techo de la vivienda ubicada en la Finca Lucitania un total anual de 143,91 m3 de agua teniendo en cuenta que las dimensiones de este son de 7 m de ancho por 15 m de largo; con la instalación de estos sistemas en conjunto se lograría aumentar la disponibilidad del recurso hídrico en la vivienda.

Referencias bibliográficas.

Concejo Municipal de San Francisco Cundinamarca. (2016). *Plan de desarrollo "Sumate al cambio 2016-2019" del municipio de San Francisco Cundinamarca.* Obtenido de https://sanfranciscocundinamarca.micolombiadigital.gov.co/sites/sanfranciscocundinamarca/content/files/000194/9662_9649_plandedesarrollo20162019sumatealcambio.pdf

Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. (Junio de 2014). *Plan de Manejo Ambiental, Distrito de Manejo Integrado DMI Chuchilla el Chuscal, Municipio de La Vega Cundinarmaca.* Obtenido de https://www.car.gov.co/uploads/files/5ac7a3db83e23.pdf

FAO. (2013). Obtenido de CAPTACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE AGUA DE LLUVIA Opciones técnicas para la agricultura familiar en América Latina y el Caribe: http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/AGRO_Noticias/docs/captacion_agua_de_lluvia.pdf

Mendoza, B., & Castañeda, F. (2014). *Criterios metodológicos para la definición de sistemas de captación de aguas con base en lluvia horizontal*. Obtenido de https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/1748/1/Atrapanieblas%20B.%20Mendoza%20F.%20Casta%C3%B1eda.pdf

Naciones Unidas. (2020). *Desafios Globales - Agua.* Obtenido de https://www.un.org/es/global-issues/water

ACODAL
ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
65° CONGRESO INTERNACIONAL
Agua, Saneamiento, Ambiente y Energías Renovables
Bogotá - Colombia
Centro de Convenciones Ágora
Julio 13, 14 y 15 de 2022

Degradación de colorante Rojo-G utilizado en el teñido de fibra de alpaca porprocesos Fenton y foto-Fenton asistido por cavitación hidrodinámica

Miguel Angel de Dios Flores Alarcón[1], Rafaela Yoselin Arenas Jarro[1], Kiara Alejandra García Bustos[1],Gilberto Jesús Colina Andrade[1], David Alfredo Pacheco Tanaka[1], Ruly Terán Hilares[1]*

[1]Departamento de Ciencias e Ingenierías Biológicas y Químicas, Universidad Católica de Santa María— UCSM, Urb. San José s/n—Umacollo, Arequipa 04000, Perú.
**Autor corresponsal:* Departamento de Ciencias e Ingenierías Biológicas y Químicas, Universidad Católica de Santa María— UCSM, Urb. San José s/n—Umacollo, Arequipa 04000, Perú. Email: rteran@ucsm.edu.pe

Abstract

Hydrodynamic Cavitation (CH) corresponds to the formation, growth and violent collapse of micro-nano bubbles generated by devices such as an orifice plate or Venturi tubes resulting in the release of large amounts of energy, hot spots, turbulence, and oxidants radicals, which together can break down pollutants in industrial effluents. One of the effluents which involves a great challenge for its treatment, are those coming from textile industry. The cavitation process can be intensified in combination with advanced oxidation processes such as Fenton and photo-Fenton using ultraviolet (UV) light. An experimental design for the optimization of Fenton processes with different concentration levels for H_2O_2 and $FeSO_4$ was carried out. Subsequently, under optimized Fenton process a photo-Fenton was evaluated. The model turned out to be significant and well adjusted, so the equation attended to predict the behavior of the response variable. Finally, the exposure of the Red-G dye to UV light was added in the optimized system of Fenton processes assisted by CH, significantly, enhancing the degradation to more than 99% in 15 minutes of treatment. The present study demonstrates that the Fenton processes assisted by hydrodynamic cavitation adding UV light treatment are efficient for the degradation of the Red-G dye used in the dyeing of alpaca wool, therefore might result in an interesting option for treatment of textile effluents.

KeyWords: Red-G dye; Alpaca wool; hydrodynamic cavitation; photo-Fenton process.

ACODAL
ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
65° CONGRESO INTERNACIONAL
Agua, Saneamiento, Ambiente y Energías Renovables
Bogotá - Colombia
Centro de Convenciones Ágora
Julio 13, 14 y 15 de 2022

DEGRADACIÓN DE COLORANTE ROJO-G UTILIZADO EN EL TEÑIDO DE FIBRA DE ALPACA POR PROCESOS FENTON ASISTIDO POR CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA

Resumen

Cavitación Hidrodinámica (CH) corresponde a la formación, crecimiento y colapso violento de micro-nano burbujas generadas por dispositivos como una placa de orificios y/o tubos Venturi resultando en la liberación de gran cantidad de energía, "*hot spots*", turbulencia y radicales oxidantes, que en conjunto pueden degradar contaminantes en efluentes industriales. Uno de los efluentes que involucra un gran desafío para su tratamiento, son los provenientes de la industria textil. El proceso de cavitación puede ser intensificado combinado con procesos de oxidación avanzada tales como Fenton y luz ultravioleta (UV). Se realizó un diseño experimental para la optimización de procesos Fenton con distintos niveles de concentración de H_2O_2 y $FeSO_4$. Posteriormente, se evaluó el proceso foto-Fenton con incidencia de luz UV. El modelo resultó ser significativo y ajustarse bien, por lo que la ecuación sirvió para predecir el comportamiento de la variable de respuesta. Finalmente, se sumó la exposición del colorante Rojo-G a la luz UV en el sistema optimizado de proceso Fenton asistido con CH, potenciando significativamente la degradación a más del 99% en 15 minutos de tratamiento. El presente estudio demuestra que los procesos Fenton asistido por cavitación hidrodinámica sumando a la exposición a la luz UV, permiten eficientemente la degradación del colorante Rojo-G utilizado en el teñido de la fibra de alpaca; por lo tanto, resulta en una opción interesante para el tratamiento de efluentes textiles.

Palabras clave: cavitación hidrodinámica, fibra de alpaca, rojo-G, proceso foto-Fenton.

Introducción

Cavitación Hidrodinámica (CH) corresponde a la formación, crecimiento y colapso violento de micro-nano burbujas generadas por dispositivos como una placa de orificios y/o tubos Venturi. El colapso violento de cavidades resulta en la liberación de gran cantidad de energía, "*hot sposts*", turbulencia y radicales oxidantes, que en conjunto pueden degradar contaminantes recalcitrantes o fraccionar la materia orgánica de cualquier tipo de efluente (B. Wang et al., 2021). Uno de los efluentes que involucra un gran desafío para su tratamiento, son los provenientes de la industria textil. De acuerdo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible 6 "Agua limpia y Saneamiento" (ODS, ONU), las aguas de desecho producidas debido a las actividades humanas son vertidas directamente a los ríos y lagos sin ningún tratamiento previo en más del 80% de los casos. La variación del color debido a las diferentes etapas del proceso textil y a los colorantes utilizados en distintas épocas del año según la demanda del mercado producen ciertos cambios fisicoquímicos en el agua, asimismo, impiden el correcto desarrollo de la biodiversidad, ya que los organismos vivos no pueden realizar procesos fundamentales como la fotosíntesis debido al color del tinte que no deja el paso a los fotones provenientes del sol (Agarkoti *et al*., 2021). El proceso de cavitación puede ser intensificado combinado con procesos de oxidación avanzada tales como Fenton y foto-Fenton con incidencia de luz ultravioleta (UV), lo que resulta en un proceso altamente eficiente. El proceso Fenton ($FeSO_4$ y H_2O_2) intensifica la remoción del colorante Rojo-G debido a sus características como oxidante catalítico, y por esa misma razón es prometedor para el tratamiento de efluentes textiles. Por lo tanto, la cavitación hidrodinámica es potenciada cuando se realiza en conjunto con otros procesos de oxidación avanzada (Agarkoti *et al*., 2021). El presente estudio tiene por objetivo evaluar y optimizar procesos Fenton asistido por cavitación hidrodinámica para la degradación del colorante Rojo-G utilizado en el teñido de la fibra de alpaca.

Metodología

El colorante Rojo-G fue suministrado por una empresa textil local en Arequipa Perú. El peróxido de hidrógeno al 35%, el sulfato de hierro (II), el ácido sulfúrico al 95-97% y el hidróxido de sodio se obtuvieron de Merck & Co., Inc. Las soluciones acuosas fueron agua destilada.

El sistema de cavitación hidrodinámica para el tratamiento con colorante Red-G se construyó en acero inoxidable (Fig. 1). Como se observa en la Fig. 1, el sistema es provisto por bomba centrífuga (1.4 CV) para forzar el paso de solución a través de la placa orificio, generando fenómeno de cavitación. El dispositivo de cavitación estaba compuesto por una placa orificio con configuración cuadrática y una sección tipo Venturi.

Inicialmente, se comprobó que el porcentaje de degradación del colorante Rojo-G por cavitación hidrodinámica se incrementó mediante la adición de reactivos Fenton (H_2O_2 y $FeSO_4$). Luego de llevar a cabo una serie de ensayos, se dilucidó que el pH del colorante influenciaba en la degradación de este, tal y como fue reportado por Wang *et al.* (2022). Se planteó un pH 2 y 25°C de temperatura como las condiciones donde

ocurría la más alta remoción tratando el colorante únicamente por CH. Posteriormente, se realizó un diseño experimental para la optimización de procesos (Tabla 1) con los niveles superiores e inferiores de las variables concentración de H_2O_2 y $FeSO_4$ en ppm, establecidas en base al estudio de Wang *et al*., (2022) y de Bethi *et al.*, (2021). La concentración de Rojo-G fue determinada empleando un Espectrofotómetro UV-VIS *Genesys* 150 (USA), donde la absorbancia medida a una longitud de onda de 494 nm fue transformada a concentración de colorante empleando una curva estándar previamente desarrollada. Por último, se evaluó la exposición a luz ultravioleta (UV) al diseño optimizado por el programa *Design-Expert (DX)* versión 12.

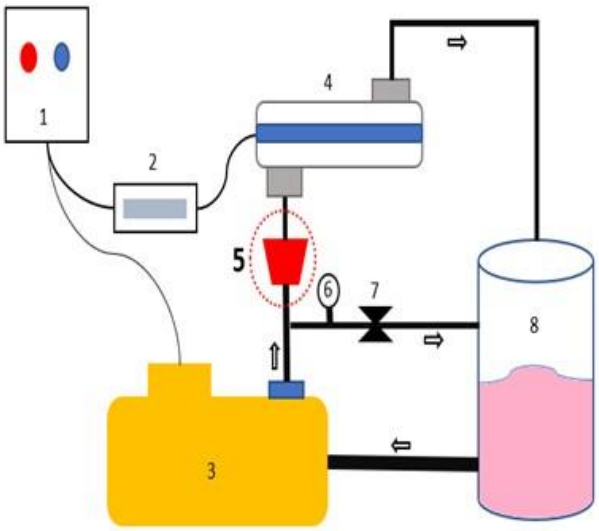


Figura 1. Sistema de cavitación hidrodinámica compuesto por: panel eléctrico (1), generador de luz ultravioleta (2), bomba (3), cámara de luz ultravioleta (4), dispositivo de cavitación (5), manómetro (6), válvula (7), depósito de recirculación (8).

Resultados y discusión

Los factores del diseño experimental mostrado en la Tabla 1 tienen de variable de respuesta al porcentaje de remoción de colorante Rojo-G que fue calculado a partir de la concentración posteriormente a la toma de muestra durante 30 minutos de tratamiento.

Tabla 1. Remoción del colorante Rojo-G por procesos Fenton asistido por cavitación hidrodinámica.

Corrida	Concentración (ppm)			Remoción del colorante (%)
	Peróxido de hidrógeno	Sulfato de Hierro (II)	Colorante Rojo-G	
1	240	7.5	35	43.28
2	170	2.5	20	25.09
3	170	5.0	35	30.45
4	170	7.5	20	47.07
5	100	5.0	20	27.70
6	170	2.5	50	41.27
7	100	5.0	50	34.19
8	240	5.0	20	43.57
9	170	7.5	50	30.53
10	170	5.0	35	31.66
11	240	5.0	50	40.71
12	240	2.5	35	32.07
13	100	7.5	35	31.73
14	100	2.5	35	27.72
15	170	5.0	35	30.11

Los datos conseguidos se analizaron en el programa *DX* obteniendo de resultado el análisis estadístico mostrado en la Tabla 2, donde se observa las diferentes interacciones de los parámetros del modelo planteado, siendo la concentración de H_2O_2, $FeSO_4$ y colorante Rojo-G las variables A, B y C, respectivamente. El valor de Fisher (valor de F) del modelo es alto, y su valor de Probabilidad (valor de p) es igual a 0.0002 indicando que el modelo es significativo. El único término del modelo que no es significativo es el C, puesto que su valor de p es mayor 0.0500. Además, el valor de F de la Falta de ajuste indica que el modelo se ajusta bien (Abbas-Shiroodi et al., 2021).

Tabla 2. Tabla ANOVA para modelo Cuadrático Reducido

Fuente	Suma de cuadrados	g.l.	Medias cuadráticas	Valor de F	Valor de p
Modelo	629.49	7	89.93	24.03	0.0002*
A- H2O2	183.27	1	183.27	48.98	0.0002*
B- FeSO4	87.52	1	87.52	23.39	0.0019*
C- Rojo-G	1.34	1	1.34	0.3572	0.5689
AB	12.96	1	12.96	3.46	0.105
AC	21.86	1	21.86	5.84	0.0463*
BC	267.65	1	267.65	71.53	< 0.0001*
C^2	54.9	1	54.9	14.67	0.0065*
Residual	26.19	7	3.74		
Falta de ajuste	24.87	5	4.97	7.49	0.1219
Error	1.33	2	0.6637		
Total	655.68	14			

** Significativo al 95% de nivel de confianza.*

Como resultado del análisis del diseño se obtuvo la Ecuación 1 que modela el comportamiento de los factores y predice el porcentaje de remoción del colorante Rojo-G cuando se le otorgan niveles a los factores. Los coeficientes de los factores muestran aumento y disminución en la variable de respuesta. En este caso, se observa que la concentración de H_2O_2 y $FeSO_4$ son las variables que tiene mayor influencia en el porcentaje de remoción del Rojo-G.

$$Remoción\ (\%) = 32.43 + 4.79C_{H_2O_2} + 3.31C_{FeSO_4} + 0.41C_{Rojo-G} + 1.80C_{H_2O_2}C_{FeSO_4} - 2.34C_{H_2O_2}C_{Rojo-G} - 8.18C_{FeSO_4}C_{Rojo-G} + 3.83(C_{Rojo-G})^2$$

Ecuación 1

Se procedió a comprobar el diseño optimizado del proceso Fenton empleado, la dosis fue de 227.156 ppm de H_2O_2, 6.861 ppm de Fe_2SO_4 y una concentración inicial de 20.111 ppm de colorante obteniendo en tres repeticiones más del 47% de degradación del colorante Rojo-G que fue superior al intervalo de predicción bajo.

En la Figura 4 se observa las gráficas de contorno obtenidas del análisis con DX. Como puede ser observado en la Figura 4A, la remoción es más del 40% conforme se aumenta la concentración de H_2O_2 y $FeSO_4$, esto conlleva a que cuando se reduce la concentración de colorante y se incrementa la concentración del H_2O_2 (Figura 4B) el porcentaje de remoción se intensifica, mismo fenómeno que puede ser observado en la Figura 4C donde con una baja concentración de colorante y un alta concentración de Fe_2SO_4, la remoción aumenta a más del 45% en 30 minutos.

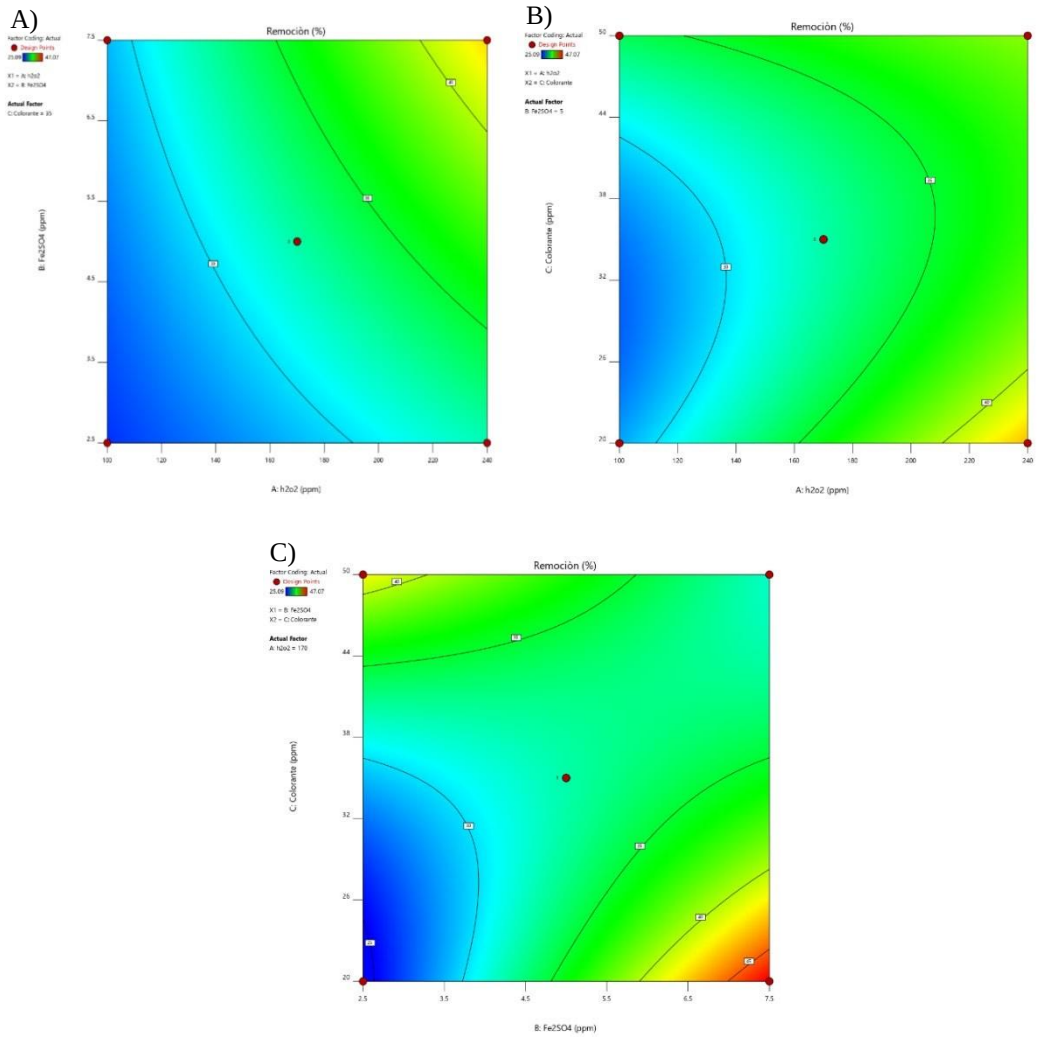


Figura 2. Graficas de contorno de: concentración de A) H_2O_2 vs. Fe_2SO_4, B) H_2O_2 vs. colorante y C) Fe_2SO_4 vs. colorante, en función del porcentaje de remoción como variable de respuesta.

Por último, al tratamiento optimizado se sumó la exposición del colorante Rojo-G a luz UV en el sistema de cavitación. Los resultados mostrados en la Figura 3, muestran que la CH degrada en menor porcentaje en 15 min de proceso, el mismo que se ve potenciado significativamente con la combinación con proceso Fenton y foto-Fenton con incidencia de luz UV. Combinando los 3 procesos, se alcanzó una remoción de más del 90% en 8 min demostrando que los procesos de oxidación avanzada actúan en sinergia (Agarkoti *et al*., 2021).

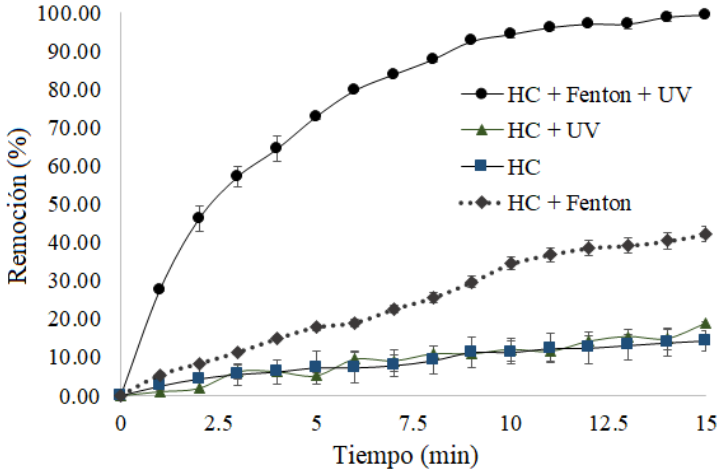


Figura 3. Comparación del porcentaje de remoción del colorante Rojo-G por diferentes procesos de oxidación avanzada asistido por cavitación hidrodinámica.

Conclusiones

La degradación del colorante Rojo-G mediante procesos Fenton asistido por CH fue evaluada, comprobada y optimizada. Los parámetros operacionales óptimos fueron una presión de entrada de 450000 Pa, pH de 2, dosis de 227.156 ppm de H_2O_2, 6.861 ppm de $FeSO_4$ y una concentración inicial de 20.111 ppm de colorante. La interpretación del análisis estadístico del modelo a un 95% de nivel de confianza recomienda que se utilice una concentración baja de colorante Rojo-G, con niveles altos de los reactivos Fenton para lograr un alto porcentaje de degradación en un menor tiempo superando el 47% durante 30 minutos. Adicionalmente, el tratamiento en foto-Fenton con incidencia de luz UV, logran reducir radicalmente el tiempo de tratamiento alcanzando la degradación de más del 99% del Rojo-G en 15 min. Finalmente, la combinación de todas estas tecnologías con sus diseños y parámetros optimizados, son eficientes en la degradación del colorante Rojo-G utilizado para teñir fibra de alpaca y por lo tanto pueden resultar en una opción interesante para el tratamiento de efluentes textiles con posibilidades de realizar su escalamiento debido al bajo costo de la tecnología.

Referencias bibliográficas

Abbas-Shiroodi, Z., Sadeghi, M. T., & Baradaran, S. (2021). Design and optimization of a cavitating device for Congo red decolorization: Experimental investigation and CFD simulation. *Ultrasonics Sonochemistry*, *71*, 105386. https://doi.org/10.1016/J.ULTSONCH.2020.105386

Agarkoti, C., Thanekar, P. D., & Gogate, P. R. (2021). Cavitation based treatment of industrial wastewater: A critical review focusing on mechanisms, design aspects, operating conditions and application to real effluents. *Journal of Environmental Management*, *300*, 113786. https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2021.113786

Bethi, B., Sonawane, S. H., Bhanvase, B. A., & Sonawane, S. S. (2021). Textile Industry Wastewater Treatment by Cavitation Combined with Fenton and Ceramic Nanofiltration Membrane. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, *168*, 108540. https://doi.org/10.1016/J.CEP.2021.108540

Wang, B., Su, H., & Zhang, B. (2021). Hydrodynamic cavitation as a promising route for wastewater treatment – A review. *Chemical Engineering Journal*, *412*, 128685. https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2021.128685

Wang, J., Wang, J., Yuan, R., Liu, J., Yin, Z., He, T., Wang, M., Ma, F., Zhou, B., & Chen, H. (2022). Degradation of acid red 73 wastewater by hydrodynamic cavitation combined with ozone and its mechanism. *Environmental Research*, *210*. https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2022.112954

ACODAL
ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
65° CONGRESO INTERNACIONAL
Agua, Saneamiento, Ambiente y Energías Renovables
Bogotá - Colombia
Centro de Convenciones Ágora
Julio 13, 14 y 15 de 2022

Incremento de la fertilidad de suelos agrícolas del Municipio de Piedecuesta en Santander a través de la aplicación de abonos

Angelica Muskus[1*], Karolay Corzo[1], Sandra Correa[1]

[1]Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad Pontificia Bolivariana, Seccional Bucaramanga
**Autor corresponsal: Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad Pontificia Bolivariana, Seccional Bucaramanga, Kilómetro 7 Autopista Piedecuesta, Floridablanca, Santander, Colombia.* Código Postal. Colombia. Email: angelica.muskus@upb.edu.co

Abstract

The following project was carried out with the objective of proposing different alternatives to improve the quality of the soil in an area where blackberry is grown, located in the Municipality of Piedecuesta, Santander, in order to correct the different problems that have been presenting with the Over the years, such as the increase in the budget due to the application of chemical fertilizers and inconveniences when applying them, and the loss of quality of the blackberry. For the development of the project, the physical-chemical study of 4 different samples of the same property was carried out, then, composting was carried out for approximately 19 weeks with organic waste to obtain compost. The fertilizer was applied in a pilot crop, on a laboratory scale, where soil 70%-compost 30%, soil 50%-compost 50%, soil 100%-liquid fertilizer 100% and soil 100% (blanc) were mixed. selected the cabbage seed to finally analyze the behavior in each one. Through the measurement of the stem, root and leaves, an improvement in the productivity of the plant was observed with an increase of up to 40%, in the samples in which 70% soil and 30% compost were mixed with respect to the control sample.

KeyWords: Agriculture, fertilizers, germination test, soil quality

ACODAL
ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
65° CONGRESO INTERNACIONAL
Agua, Saneamiento, Ambiente y Energías Renovables
Bogotá - Colombia
Centro de Convenciones Ágora
Julio 13, 14 y 15 de 2022

INCREMENTO DE LA FERTILIDAD DE SUELOS AGRÍCOLAS DEL MUNICIPIO DE PIEDECUESTA EN SANTANDER A TRAVÉS DE LA APLICACIÓN DE ABONOS

Resumen

El siguiente proyecto se realizó con el objetivo de plantear diferentes alternativas para mejorar la calidad del suelo en una zona donde se cultiva mora castilla ubicada en el Municipio de Piedecuesta, Santander, con el fin de corregir las diferentes problemáticas que se han ido presentando con el paso de los años como, el aumento de presupuesto por aplicación de fertilizantes químicos e inconvenientes al aplicarlos, y la pérdida de calidad de la mora. Para el desarrollo del proyecto se realizó el estudio físico-Químico de 4 muestras diferentes del mismo predio, seguidamente, se realizó compostaje durante aproximadamente 3 meses con residuos orgánicos para obtener compost y abono líquido. Dichos abonos se aplicaron en un cultivo piloto, a escala de laboratorio, donde se mezcló suelo 70%-compost 30%, suelo 50%-compost 50%, suelo 100%-abono líquido 100% y suelo 100% (blanco), se seleccionó la semilla de repollo para finalmente analizar el comportamiento en cada uno. A través de la medición del tallo, raíz y hojas, se observó una mejora en la productividad de la planta con un aumento hasta del 40%, en las muestras en las que se mezcló 70% suelo y 30% de compost con respecto a la muestra control.

Palabras clave: Abonos, agricultura, calidad del suelo, ensayo de germinación

Introducción

La agricultura y su problemática actual

La agricultura es la actividad más transversal al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Es una actividad que se encuentra relacionada directamente con el ODS 2 poner fin al hambre, lograr la seguridad alimentaria y la mejora de la nutrición y promover la agricultura sostenible; pero también con otros ODS cómo el fin de la pobreza (ODS1), vida saludable (ODS3), uso y calidad del agua (ODS6), crecimiento económico (ODS8), Producción y consumo responsable (ODS12), respuesta al cambio climático (ODS13), la biodiversidad (ODS15), es así como observamos la agricultura como fuente de la solución pero también de las problemáticas relacionadas con la sostenibilidad a nivel mundial.

La población mundial sigue avanzando, la presión sobre la productividad también va en aumento a la par del incremento de prácticas propias del sector como el uso de agroquímicos y pesticidas, la accesibilidad a recursos hídricos, relación costo beneficio para el agricultor, riesgos climáticos y sobreexplotación de los recursos. Es por esto que nace el proyecto para mejorar la calidad de los suelos y con ello aumentar la productividad de los cultivos en el Municipio de Piedecuesta, Santander, que hace parte de los mayores productores de mora en Colombia, es el segundo productor a nivel nacional y el primero a nivel departamental.

La calidad del suelo es un componente que define la calidad ambiental, dentro de estos componentes también encontramos la calidad del agua y del aire que impactan directamente el consumo, la salud humana y la de los ecosistemas. Por otra parte, la calidad el suelo no sólo se limita a la identificación del grado de su contaminación, si no que se extiende hasta establecer su capacidad para brindar los servicios eco-sistémicos, sostener la productividad biológica, mantener la calidad ambiental, la producción de los cultivos y la salud humana y animal. Entendemos que el suelo se compone de múltiples fases, la líquida, la sólida y la gaseosa y sus múltiples interacciones son la base de las variadas funciones que este ofrece. La multi-funcionalidad del suelo y su capacidad de prestar diferentes beneficios, lo centra como una de los recursos que recibe alto impacto ambiental. Es así como además de la pérdida de la calidad del suelo encontramos otras problemáticas que tienen que ver directamente con sus propiedades como son la erosión, compactación, contaminación, pérdida de biodiversidad, salinización, pérdida de materia orgánica, deslizamientos e inundaciones.

En suelos agrícolas, una problemática que se pretende abordar es la de informar a los agricultores sobre buenas prácticas en sus cultivos y así disminuir impactos negativos a la salud o al medio ambiente. El suelo en estudio se ubica en el Municipio de Piedecuesta, lleva más de 30 años produciendo mora, sin embargo, recientemente se ha evidenciado un declive en la productividad del cultivo y un aumento en los gastos de inversión por compra de insumos, adicionalmente, se realizan prácticas constantes que no son amigables con el medio ambiente, como fumigaciones cada 15 días. Esto lo hacen con el fin de eliminar plagas como el coquito y trips que se presentan usualmente en el cultivo de la mora, lo anterior ha generado que se presenten afectaciones en la salud como irritaciones de las vías respiratorias entre los que habitan el predio.

Usualmente los pesticidas provienen de compuestos clorados, fosforados, carbamatos, organofosforados, entre muchos otros, teniendo todos en común el causar impactos no sólo ambientales por efectos ecológicos sino también a nivel de salud para el usuario, dichos químicos pueden producir irritaciones constantes de las vías respiratorias y las mucosas y enfermedades como el cáncer de vejiga, colon, mama, pulmón, asma,

diabetes, Parkinson y efectos neuropsicológicos entre otros. Ambientalmente, sus efectos se pueden ver en los suelos ya que altera sus propiedades físico-químicas y pueden llegar a contaminar otros medios como el agua ya sea superficial o subterránea a través de mecanismos como la escorrentía superficial o la infiltración.
Siendo el suelo una de los recursos afectados en el desarrollo de los cultivos de la región, se desea a través del proyecto incluir la aplicación de los conceptos de economía circular, en dónde se busca identificar los residuos orgánicos generados en la práctica agrícola del predio en estudio, para que sean aprovechados, reutilizados y administrados al suelo en forma de abonos que mejoraran la calidad y la productividad de los cultivos. Con la aplicación de este modelo de producción sostenible se promueve la optimización de los recursos, la reducción en el consumo y compra externa abonos y el aprovechamiento de los residuos generados.

El proceso de compostaje

Existen diferentes tipos de abonos de origen animal, vegetal o la mezcla de estos. Entre los más destacados se encuentran el Estiércol, Guano de Isla, Abono verde, Bochashi, Bioabono de praderas, el lixiviado generado del proceso del compostaje, entre muchos otros (Yugsi, L, 2011).
Un proyecto realizado en el Municipio de Ciénega de Oro en Córdoba, utilizó un tipo de abono orgánico, el Bocashi mezclado con Lombrinaza, y se aplicó en distintas cantidades por hectáreas a suelos ácidos donde se cultiva Yuca, utilizando como método de comparación un testigo químico, se determinó la diferencia de la aplicación de estos dos manejos a través del análisis de indicadores en la cosecha, como número de raíces por planta, masa seca de raíz y producción. Los resultados de evaluación de los indicadores mostraron que el testigo químico obtuvo resultados inferiores al Bochashi y se concluyó que el uso de Bochashi más Lombrinaza favoreció notablemente la calidad del suelo, aumentando su actividad microbiológica, humedad, estructura, cantidad de materia orgánica, aumento de la actividad en la raíces para absorber nutrientes (Cabellero, C. E,M., Santos, P. J,M y Orosco, J. A, 2016).

En el Municipio San Juan de Urabá (Antioquia) se desarrolló un proyecto con el fin de evaluar el impacto de distintos tipos de abonos orgánicos (Micorrizas, Bocashi, Biol y Lombriabono) en las etapas de crecimiento y producción del Plátano Harton. Los grandes cultivos al estar usando constantemente fertilizantes, sales, productos agroquímicos y el elevado volumen de riego, provoca lixiviación de nutrientes y percolación, alterando el pH del suelo y causando toxicidad, de igual manera cada vez que se termina una siembra se extraen algunos minerales del suelo, perdiendo la

dinámica biológica. Se determinó que el efecto de los residuos orgánicos en el cultivo influyó notablemente en el aumento del racimo en el segundo ciclo, en la longitud y grosor de los dedos de la primera mano y tercera mano, la aplicación de los abonos orgánicos afectó positivamente alcanzando estándares de calidad tipo exportación (Barrera J. L, Combatt E. M, y Ramírez Y. L, (2011). Estos son algunos ejemplos de cómo la aplicación del compost ayuda no sólo al suelo si no que aumenta la productividad de los cultivos.

El compostaje es el proceso de transformación de residuos orgánicos como por ejemplo estiércol animal, residuos de alimentos, hojas, verduras, frutas etc., por acción controlada de los microorganismos descomponedores que dan como resultado un producto totalmente orgánico, estable e higienizado aprovechable por el suelo y por las plantas (Puerta, 2004). Al ser un proceso que involucra la actividad microbiana, se rige por variables como la temperatura, el pH, la humedad, la aireación y la relación C/N (carbono / nitrógeno).

El inicio del proceso del compostaje se encuentra marcado por la acumulación de los residuos orgánicos en descomposición que tienden a guardar calor y a acumular la temperatura, al mismo tiempo se produce un descenso en el pH (etapa mesofílica). En la siguiente gráfica se muestran las etapas del proceso de compostaje (Ver Imagen 1):

En esta primera etapa mesófila, actúan bacterias de tipo mesófilas aerobias, produciendo ácidos y liberando calor. En esta etapa la temperatura no llega a superar los 40°C. Seguidamente, en la segunda etapa, termófila, caracterizada por intensa actividad microbiana representada por bacterias y actinomicetos termófilos, se degrada la materia orgánica más pesada. En esta etapa las temperaturas pueden alcanzar los 60 o 70°C. A 60ºC los hongos termófilos mueren y la reacción se lleva a cabo por las bacterias formadoras de esporas y los actinomicetos. De esta manera se asegura la destrucción de los microorganismos patógenos. El consumo gradual de los materiales fácilmente degradables, ralentiza la reacción y el calor disminuye iniciando una nueva etapa, la de enfriamiento. En esta etapa de enfriamiento, se comienza a evidenciar un descenso en la temperatura hasta alcanzar la temperatura ambiente. En la etapa final o de maduración, las variables se estabilizan, la generación y pérdida de peso del compost es prácticamente nula y se producen reacciones de condensación y polimerización dando lugar al humus.

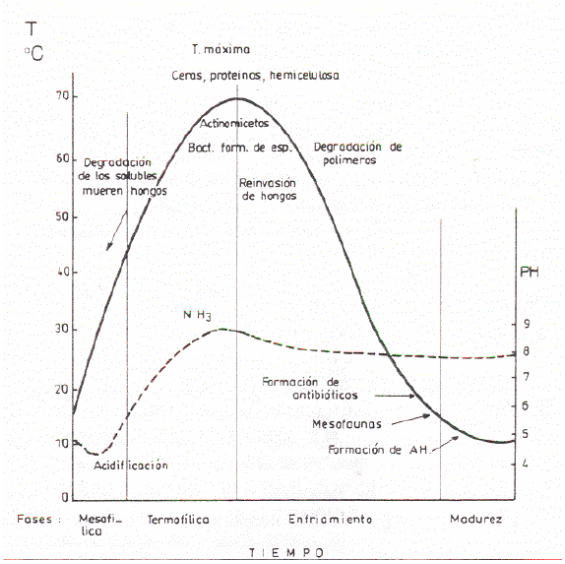


Figura 1. Etapas del proceso de compostaje
Fuente: Evaluación de la temperatura y pH durante las diferentes etapas del compostaje (Dalzell et al., 1981)

Sistemas para desarrollar el proceso el compostaje

El sistema de compostaje para el tratamiento de los residuos orgánicos se puede desarrollar en pilas al aire (sistema abierto) o en fermentadores (sistema cerrado). Los sistemas abiertos son los más frecuentes y en general en ambos sistemas se suelen emplear materiales como el cemento, plástico o algún metal anticorrosivo. Es necesario tener en cuenta los factores que inciden en este procedimiento como, pH, Humedad, Temperatura, Oxígeno, Tamaño de partícula y la relación C/N, estos determinaran la calidad del abono (Santana, W. B., 2019). El procedimiento se puede realizar en pilas o lechos estáticos, en recipientes o baldes verticales, o cualquier diseño que sea efectivo para poder elaborar los respectivos seguimientos. Cabe resaltar que en condiciones aeróbicas se debe hacer el proceso de aireamiento para que se pueda degradar el material, durante este proceso se generará un lixiviado el cual se puede recircular, o se puede depositar de manera que haya constante circulación y se genere un abono líquido. El procedimiento puede tardar entre 3 a 5 meses, si se agregan microorganismos este se acelerará, luego de obtener el abono se deberán tomar los respectivos análisis, se tamiza y se almacena.

Objetivos del proyecto

Los objetivos planteados para el proyecto se encuentran encaminados a la implementación de estrategias de mejoramiento de suelo en una finca del Municipio de Piedecuesta, Santander a través de la aplicación de abonos orgánicos. Para el cumplimiento de este objetivo se inició con la identificación de las propiedades físico-químicas de las muestras del suelo tomadas en la zona de cultivo, proveniente del Municipio de Piedecuesta. La siguiente fase consistió en la elaboración de un abono orgánico de calidad a partir de desechos orgánicos y en una última fase, se evaluó la eficiencia de la aplicación del abono orgánico en el mejoramiento del suelo a través del seguimiento de un cultivo piloto.

Este proyecto integra los beneficios ambientales, económicos y sociales en la zona de aplicación del proyecto. El beneficio ambiental se centra en el mejoramiento de la calidad del suelo y su capacidad de soportar servicios ecosistémicos; el beneficio social está relacionado con la calidad de los productos y en la reducción en las tasas de aplicación de fertilizantes, agroquímicos y pesticidas, lo que representa mejor calidad de vida; el beneficio económico está relacionado con el aumento de la productividad y aumento en volúmenes de cosecha, adicionalmente ahorro en la adquisición de insumos a aplicar al cultivo.

Materiales y método

Suelo en estudio

El área seleccionada para el desarrollo del estudio se ubica en el Municipio de Piedecuesta, Santander, en la vereda la Mata, Coordenadas 7°04'05.9"N 73°01'53.9"W. Es un suelo utilizado actualmente para el Cultivo de mora de Castilla con una antigüedad de más de 30 años y un total de 7 hectáreas.

Muestreo

Las muestras de suelo se obtuvieron de manera que la distribución dentro del área de estudio fuera sistemática al azar. Se removió la cobertura vegetal en el área de muestreo (1-3 cm). El área total del predio se dividió en 4 zonas y se realizaron 4 muestreos diferentes, en cada zona se tomaron de 5 a 7 muestras de suelo en un área de 20 cm x 20 cm y 15 cm de profundidad, la muestra tomada fue de 200-300g, se transfirió a una bolsa de plástica sellada al vacío. Luego de tener las muestras se extrajeron todos los materiales extraños, restos de vegetación, y se dejaron secando al aire libre extendidas en bandejas. Posteriormente, se tamizaron para proceder con los análisis físicoquímicos. Los análisis físicos químicos realizados se muestran a continuación (Ver Tabla 1):

Tabla 1. Análisis físico químicos iniciales realizados a las muestras de suelo

Análisis	Método
Textura.	Hidrómetro de Bouyoucos - Densimétrico. Norma Técnica Colombiana NTC 6299 calidad del suelo. determinación de la Textura por Bouyoucos
Humedad	Gravimétrico
Densidad aparente	Cilindro
Densidad real	Probeta
pH	Potenciométrico en relación suelo/agua 1:1 (p/v). Norma Técnica Colombiana NTC 5264 calidad del suelo. determinación del pH
Conductividad	Potenciométrico en relación suelo: agua 1:2 (p/v)
Materia Orgánica	Oxidación completa
Nitrógeno Total	Extracción y titulación potenciométrica
CIC	Acetato de amonio 1m pH 7 - cuantificación por titulación volumétrica. Norma Técnica Colombia NTC 5268 calidad del suelo. Determinación de la Capacidad de Intercambio Catiónico - CIC
Fósforo	Extracción con solución de Bray II - Cuantificación espectrofotométrica en el rango visible. Norma Técnica Colombiana NTC 5350 calidad del suelo. Determinación de fósforo disponible

Elaboración del abono orgánico

Se seleccionaron los residuos orgánicos para la elaboración del abono orgánico compost. Se usó 1 bidón hermético de 130 litros, en dónde se dispusieron 30 kilogramos de residuos orgánicos triturados y 10 kilogramos de compost degradado. Durante el proceso de compostaje se controlaron las variables de pH, Temperatura y Humedad, hasta obtener una estabilidad que garantizara un abono maduro.

Aplicación del abono en cultivo piloto

En esta etapa se analizó la eficacia de la aplicación del abono elaborado en un cultivo piloto (etapa germinación) utilizando los suelos estudiados, esto se desarrolló a escala de laboratorio. Se realizaron diferentes combinaciones de abono suelo y se realizaron análisis iniciales y finales al proceso del cultivo.

El diseño experimental en esta etapa fue el siguiente (Ver Tabla 2):

Tabla 2. Diseño Experimental

Suelo	Combinación	Suelo (%)	Abono (%)
Zona 1	1	100	0
	2	70	30
	3	50	50
Zona 2	1	100	0
	2	70	30
	3	50	50
Zona 3	1	100	0
	2	70	30
	3	50	50
Zona 4	1	100	0
	2	70	30
	3	50	50

Se utilizaron semillas de repollo por ser una planta de buena adaptabilidad al clima en la zona de germinación (25ºC) y crecimiento rápido que permitiera observar buenos resultados en corto tiempo.
Así mismo, se realizaron actividades de seguimiento a través de observación y riego y análisis fisicoquímicos antes y después de la prueba de germinación. Al final se realizará el análisis de los resultados obtenidos junto con la determinación del porcentaje de eficiencia en el crecimiento de las plantas según el porcentaje de abono aplicado con respecto a través de una comparación con respecto al blanco.

Resultados y discusión

De los análisis preliminares de las muestras de suelo de las diferentes áreas de la zona muestreada se puede evidenciar una textura que va desde la Areno- franco hasta la arenosa. La densidad aparente se destaca la de la zona 1 por presentar un valor muy superior al valor normal presentado en suelo areno-franco, esto es debido a procesos de compactación animal y mecánica presentados en la zona. La humedad gravimétrica se encuentra dentro de los rangos normales el pH en la zona 4 es muy ácido, lo que puede indicar una acidez intercambiable alta y contenidos de aluminio también altos. La conductividad se encuentra dentro de los parámetros de no salinidad en todas las muestras. Las bases intercambiables como Ca, Mg, Na y K tienen una concentración mayor en las muestras de la zona 1, así como los valores de Fe. Los contenidos de material orgánico son buenos en las zonas 1 y 4 y se empieza a ver una deficiencia en las zonas 2 y 3. Ver tabla 3.

Tabla 3. Resultados análisis de los suelos en las 4 zonas muestreadas

Análisis	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
Textura	Areno-Franco	Areno-Franco	Arena	Areno-Franco
Densidad relativa (g/ml)	**4,31**	1,96	1,67	1,91
%Humedad gravimétrica	78	51	68	81
pH	6,05	6,02	6,66	**4,61**
Conductividad (dS/m)	1,311	0,645	0,721	1,252
Ca (meq/100g suelo)	**10,6**	1,60	1,93	6,02
Mg (meq/100g suelo)	**2,59**	0,23	0,41	1,39
Na (meq/100g suelo)	**1,01**	0,01	0,02	0,01
K (meq/100g suelo)	**0,36**	0,19	0,33	0,32
CIC (meq/100g suelo)	27,6	18,0	28,4	29,2
Fósforo (ppm)	86	9,58	10,7	**183**
Hierro (ppm)	**268**	37,9	93,6	159
% Materia orgánica	20,53	10,54	15,13	26,13
% Carbono orgánico	11,91	6,11	9,78	15,16

Preparación y seguimiento al compost

Se dio inicio al proceso de compostaje previa la selección y trituración de 20 Kg de material orgánico y 10 Kg de material degradado proveniente de un proceso de compostaje previo. Se ubicó un bidón de plástico con una capacidad de almacenamiento de 23 Kg. Se acondicionó la compostera con un tubo de PVC con el fin de realizar la recolección y evacuación de los gases generados durante el proceso. La duración total de la maduración del compost fue de 19 semanas en los cuales se realizó el seguimiento a parámetros como humedad, temperatura y pH. Ver figura 2 y 3.

Figura 2. Proceso de elaboración del compost
Fuente: Autoras

Se observa el proceso de descomposición de la materia orgánica durante un periodo de 19 semanas con los análisis de seguimiento de pH y temperatura tal y como se muestra en la Figura 3.

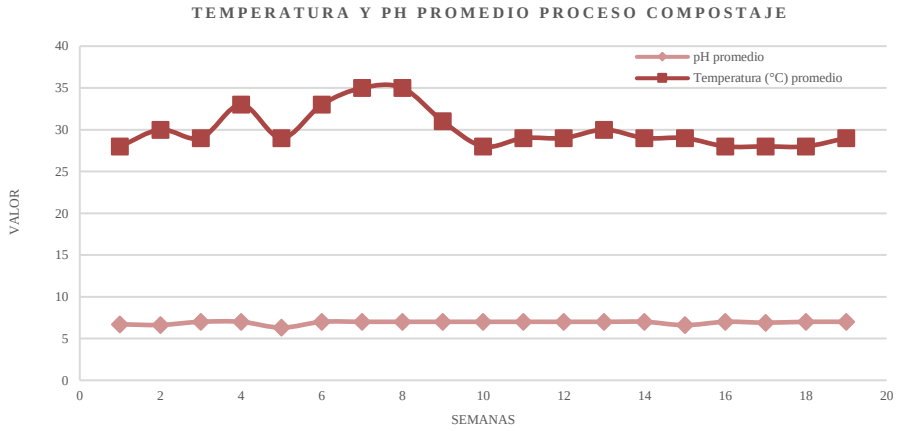


Figura 3. Seguimiento al proceso de compostaje

Los resultados finales realizados al compost ya maduro se presentan en la tabla 4. Observamos una buena estabilización del pH, conductividad eléctrica en el rango óptimo un buen porcentaje de materia orgánica, buena humedad, contenidos de nitrógeno y fósforo y buena Capacidad de Intercambio Catiónico.

Tabla 4. Resumen resultados análisis al abono

Análisis	Compost
pH	7,85
Conductividad (ds/m)	0,68
%Materia orgánica	41
%Carbono orgánico	23,2
%Humedad gravimétrica	65,3
%Nitrógeno	1,61
%Fósforo	0,36
CIC (meq/100 g suelo)	19,65

Fuente. Las autoras

Evaluación del abono producido

Para el cultivo piloto se escogieron semillas de repollo que es una planta perteneciente al grupo de las Crucíferas. Se escogió por ser una planta de rápido crecimiento y que se desarrolla bien antes de ser trasplantada al campo. El desarrollo del cultivo de repollo se da en suelos fértiles con un pH entre 6 y 6,8 y una humedad constante.

El cultivo se realizó en semilleros ubicados en el laboratorio de suelos de la Universidad Pontificia Bolivariana, se aplicaron diferentes combinaciones de abonos y suelos para así determinar su eficiencia con los datos finales de crecimiento según lo planteado en el diseño experimental.

Los resultados de esta etapa son los siguientes (Ver Tabla 5 a 8):

Tabla 5. Resumen de resultados evaluación de abono Zona 1

Muestra Zona 1			
Análisis	**Suelo 70% Compost 30%**	**Suelo 50% Compost 50%**	**Suelo 100%**
pH	6,94	7,45	5,53
Conductividad (meq/100g suelo)	1,634	3,47	1,307
%Materia orgánica	26,15	29,71	22,22
Altura total planta (cm)	7,07	7,8	8,3

Fuente. Las autoras

Tabla 6. Resumen de resultados evaluación de abono Zona 2

Muestra Zona 2			
Análisis	**Suelo 70% Compost 30%**	**Suelo 50% Compost 50%**	**Suelo 100%**
pH	7,03	7,68	5,10
Conductividad (meq/100g suelo)	2,94	4,23	1,23
%Materia orgánica	17,14	22,94	10,29
Altura total planta (cm)	7,47	6,94	7,32

Fuente. Las autoras

Tabla 7. Resumen de resultados evaluación de abono Zona 3

Muestra Zona 3			
Análisis	**Suelo 70% Compost 30%**	**Suelo 50% Compost 50%**	**Suelo 100%**
pH	6,71	7,32	4,99
Conductividad (meq/100g suelo)	2,51	3,62	1,25
%Materia orgánica	23,39	26,33	15,56
Altura total planta (cm)	7,87	7,57	6,17

Fuente. Las autoras

Tabla 8. Resumen de resultados evaluación de abono Zona 4

Muestra Zona 4			
Análisis	**Suelo 70% Compost 30%**	**Suelo 50% Compost 50%**	**Suelo 100%**
pH	6,49	7,18	4,38
Conductividad (meq/100g suelo)	1,99	2,58	2,05
%Materia orgánica	29,39	33,3	24,39
Altura total planta (cm)	9,26	7,6	6,43

Fuente. Las autoras

A nivel general se propone para la Finca ubicada en la Vereda La Mata, Piedecuesta, el cambio de prácticas como el uso de fertilizantes químicos de tal manera que por medio del uso de los residuos orgánicos generados en la finca sean usados para realizar compostaje y dicho compost sea usado como acondicionador para el suelo y plantas. Adicionalmente se propone realizar un manejo y uso sostenible del suelo como realizar periodos de barbecho, ejecutar en lo más mínimo la labranza, implementar uso de abonos verdes, disminuir los monocultivos, entre otras cosas.

El análisis realizado en los suelos iniciales del terreno demostró que tanto los macro- como micro nutrientes tuvieron concentraciones bajas, lo que se relaciona con la afectación en la calidad del crecimiento del fruto cada vez que hay cosecha, las plagas presentes, y la baja presencia de microorganismos. En la muestra 1 independientemente de que los resultados en la mezcla del suelo 100% fue donde se observó mayor crecimiento en las plantas, este presentó problemas de sequedad y marchitamiento a la segunda semana, por tanto, se establece que el uso de la mezcla suelo 70% - compost 30% aunque esté un 15% debajo de la altura total en el suelo 100% es la mejor opción. Se propone para las muestras 2, 3 y 4 que el acondicionamiento de suelo 70% - compost 30% ya que genera una mejor productividad en las plantas, aumenta su materia y carbono orgánico, neutraliza el pH y aumenta su concentración de sales sin afectarlo.

Conclusiones

Con respecto a las propiedades físico-químicas de todas las muestras del suelo se pudo determinar que tienen una textura areno-franco.

Los resultados físico químicos del compost elaborado indican su contenido alto en M.O y C.O, sin embargo, el contenido de Nitrógeno (N) es bajo en relación a las necesidades del cultivo de mora de castilla.

La mezcla de suelo 70% - compost 30% es la mejor opción para acondicionar el suelo para las muestras 2,3 y 4, ya que la productividad en las plantas fue mayor al 20% comparado con el suelo 100%; y para la muestra de suelo 1, la mezcla suelo 50% – compost 50% es la mejor alternativa debido a su alta productividad

La transferencia de conocimiento a la comunidad es de vital importancia para el fortalecimiento del sector agrícola de la región

Agradecimientos

Las autoras agradecen el apoyo de la Fundación Alianza Biocuenca, entidad financiadora del presente estudio

Referencias bibliográficas

Cabellero, C. E,M., Santos, P. J,M y Orosco, J. A. (2017). Rendimiento del cultivo de yuca con abonos orgánicos y químicos en un suelo ácido. Revista Ciencia y Agricultura. Vol 14 (1): 57-64. https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ciencia_agricultura/article/view/6088/5102

Barrera J. L, Combatt E. M, y Ramírez Y. L. (2011). Efecto de abonos orgánicos sobre el crecimiento y producción del plátano Hartón (Musa AAB). Revista colombiana de ciencias hortícolas. Vol 5 (2):186-194. http://www.scielo.org.co/pdf/rcch/v5n2/v5n2a03.pdf

Dalzell, H.W.; Gray, K. R. y Biddlestone, A. J. (1981). Composting in tropical agriculture. 2ª Ed. International Institute of Biological Husbandry. England. 36 pp

Santana, W. B. (2019). El proceso de compostaje. Ediciones Unisalle. https://books.google.com.co/books?id=-X_1DwAAQBAJ&pg=PA3&dq=proceso+compostaje&hl=es&source=gbs_selected_pages&cad=2#v=onepage&q=proceso%20compostaje&f=false

Yugsi, L. (2011). Elaboración y Uso de abonos Orgánicos. Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias -INIAP. https://books.google.com.co/books?id=ZZUzAQAAMAAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false

ACODAL
ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
65° CONGRESO INTERNACIONAL
Agua, Saneamiento, Ambiente y Energías Renovables
Bogotá - Colombia
Centro de Convenciones Ágora
Julio 13, 14 y 15 de 2022

Análisis exploratorio de Estrategias para Reducción de Emisiones de Contaminantes Atmosféricos y Climáticos en Maquinaria Móvil no de Carretera en Colombia.

Yoan Andrés Ocampo Olmos[1]

[1]Universidad Nacional Abierta y a Distancia.
**Autor corresponsal*: Apartamento 101, calle 76 No 78 - 21, La granja, Engativá, Bogotá D.C, Cundinamarca. 111051. Colombia. E-mail: yoxandres.yes@gmail.com

Abstract

This study aims to evaluate the percentage of change in atmospheric emissions by (1st) decreasing sulfur levels in diesel fuel, and (2nd) applying technological changes (Tier). This analysis is done over Non-road mobile machinery (NRMM): construction, agriculture, and industrial equipment. The methodological guides of the United States Environmental protection Agency (EPA and the European Environment Agency (EEA) were used to estimate HC, CO, NOx, PM_{10}, $PM_{2.5}$, SO_2, CO_2, and BC emissions. This research is an input to contribute to the nationally determined contributions of Latin American countries. Its application can replicated in the generation of protocols for estimating mobile sources.

Keywords: Air quality, climate change, millennium development goals, climate pollutant mitigation, sustainable development goals.

ACODAL
ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
65° CONGRESO INTERNACIONAL
Agua, Saneamiento, Ambiente y Energías Renovables
Bogotá - Colombia
Centro de Convenciones Ágora
Julio 13, 14 y 15 de 2022

ANÁLISIS EXPLORATORIO DE ESTRATEGIAS DE REDUCCIÓN DE EMISIONES DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS Y CLIMATICOS EN MAQUINARIA MÓVIL NO DE CARRETERA

Resumen

Este estudio presenta dos estrategias que están encaminadas a evaluar el porcentaje de cambio de emisiones atmosféricas por (1.) disminución en los niveles de azufre en el combustible diésel, y (2.) aplicando un cambio en los niveles tecnológicos (Tier). Este análisis se realizó para maquinaria móvil no de carretera (MMNC): equipos de construcción, agrícola e industrial. Se utilizaron las guías metodológicas de la agencia de protección ambiental de los estados Unidos (EPA) y la agencia europea de medio ambiente (EEA) para estimar las emisiones de HC, CO, NOx, PM_{10}, $PM_{2.5}$, SO_2, CO_2, y BC. La investigación es un insumo para contribuir a las contribuciones determinadas a nivel nacional de los países latinoamericanos. Su aplicación puede ser replicada en la generación de protocolos para la estimación de fuentes móviles.

Palabras clave: Calidad del aire, cambio climático, objetivos del Desarrollo del milenio, mitigación de contaminantes climáticos, objetivos de desarrollo sostenible.

Introducción

La contaminación del aire en Colombia y otros países latinoamericanos es causada principalmente por el uso de combustibles fósiles en fuentes móviles y fijas. Las mayores emisiones de material particulado menor a 10 micras (PM_{10}), monóxido de carbono (CO_2), BC y otros contaminantes del aire son ocasionadas por fuentes móviles, cuyo combustible puede ser cancerígeno, OMS (2018). La MMNC solo se ha reglamentado en Brasil y Chile, CONAMA, (2011); Geasur, (2013), mientras que en países como Colombia se ha asociado a deforestación, ilegalidad y a impactos negativos en el sistema climático y la calidad del aire. Además de contribuir activamente en la economía del país DANE (2020) su reglamentación supone una decisión coyuntural que impacte positivamente en salud pública y a la contribución nacionalmente determinada del país para combatir el cambio climático. Es por ello, que a partir de la información que actualmente se dispone en esta materia y observando que en Colombia existen muy pocas estrategias evaluadas que contribuyan a la disminución de contaminantes atmosféricos asociados a la MMNC, y basados en el impacto que tienen las altas concentraciones de estos contaminantes en el medio ambiente y la salud humana, la presente investigación está encaminada a realizar el análisis de diferentes estrategias que evalúen los cambios porcentuales de contaminantes atmosféricos-climáticos, a partir del enfoque *top-down,* (Lents, et al., 2011) observando los niveles de reducción de las emisiones de contaminantes asociados a MMNC.

Metodología

Se obtuvieron datos de MMNC importada desde el año 2013 a 2020 a partir de la información aduanera proveniente de la base de datos LegisComex específicamente de MMNC de Estados Unidos con destino a Colombia, se considerará el uso de datos de la EPA como los de mayor aceptación científica internacional, esto debido a la ausencia de datos confiables y representativos a nivel nacional. Los factores de emisión serán construidos a partir de la metodología (EPA, 2018b) estandarizada y adaptable a la presente investigación para Colombia, partiendo del porcentaje de azufre de 50 ppm en el combustible Diésel a 2020 y los estándares de emisión adoptados por la EPA. (EPA, 2018b).

Estimación de emisiones de contaminantes atmosféricos y climáticos.

Se determina la cantidad de emisiones generadas para HC, CO, NOx, PM_{10}, $PM_{2.5}$, SO_2, CO_2, y BC para MMNC por rubro (Construcción, industrial y Agricultura) aplicando la siguiente ecuación de la EPA:

$$E_c = \sum N_g * HU_g * PN_g * FC_g * FE_{c,g}$$

Ecuación (1)

(EPA, 2018a; EEA, 2019)

Donde,
Ec (g/año): Total de emisiones de cada contaminante criterio c.
Ng (maquinaria): Número de unidades de MMNC.
HUg (horas/año): Horas de uso promedio anual de MMNC.
PNg (kW): Potencia nominal promedio de la maquinaria.
FCg (adimensional): Factor de carga asociado al segmento de MMNC.
FEc.g *(*g/kW* hora): Factor de emisión para el contaminante *c* y la maquinaria agrupada *g*.

Evaluación de cambios porcentuales de contaminación atmosférica asociado a estrategias de reducción.

Una vez se estiman las emisiones de los contaminantes de estudio, se evalúa el cambio porcentual en emisiones asumiendo 1000 equipos como base si:

- **Estrategia 1:** se genera el cambio en el nivel de azufre en el combustible de 50 ppm a 20, 15 y 10 ppm según la propuesta política para el mejoramiento de la calidad de aire CONPES 3943 de 2018. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018).

- **Estrategia 2:** se genera el cambio en el nivel tecnológico base en Colombia según potencia a Tier4 Interim. Debido al retraso tecnológico de Colombia frente a Estados Unidos (EE.UU, mayor exportador), se asume que Colombia parte del nivel tecnológico que tenía EE.UU en 2007 (Figura 1).

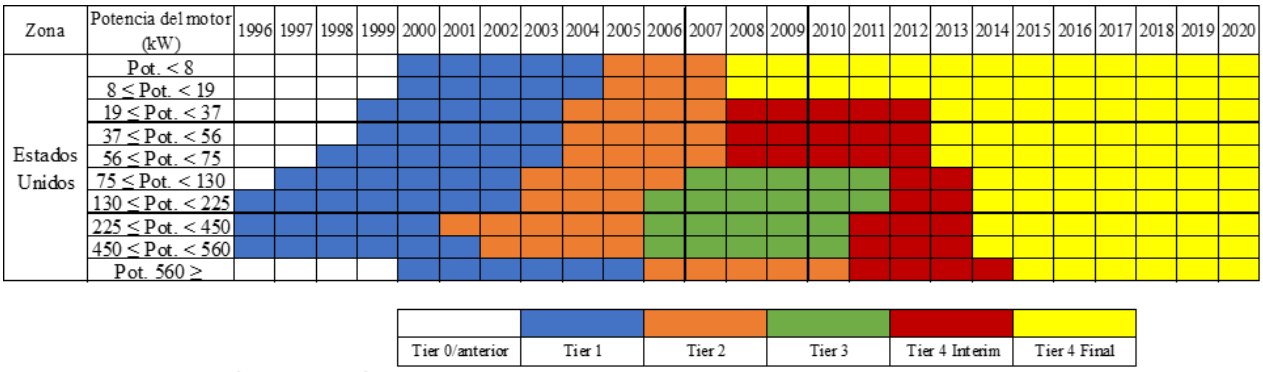


Figura 1. Evolución del estándar de emisiones de MMNC por año y rango de potencia (Pot.) para EE.UU. Adaptado de (Dallmann y Menon, 2016)

Discusión de resultados

Al evaluar la primera estrategia, donde tomando una muestra de 1000 unidades de MMNC por tipología, se obtuvo que los contaminantes PM_{10}, $PM_{2.5}$ y BC pueden presentar una reducción considerable en las emisiones de entre 0.1% y 0.6% y SO2 una reducción entre el 60 y 80% (Figura 2), pues al bajar los niveles de concentración de azufre de su rango más alto hacia los más bajos y entre rangos la reducción es proporcional al cambio de concentración de azufre en el combustible Diesel utilizado. (Figura 3).

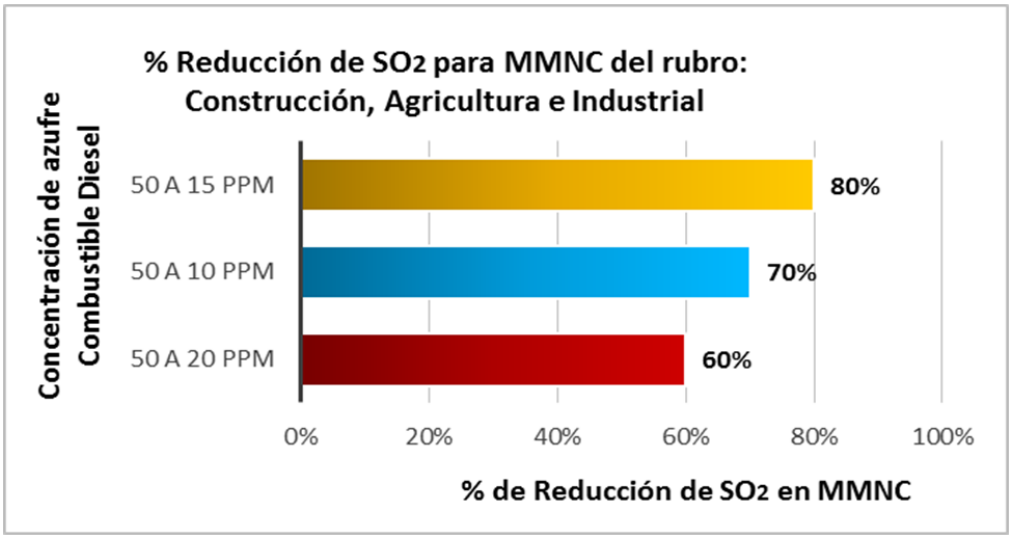


Figura 2. Porcentaje de reducción de emisiones de SO2 por el cambio en el nivel de azufre en el combustible diésel utilizado en los motores Tier 2 y 3 de MMNC. El autor.

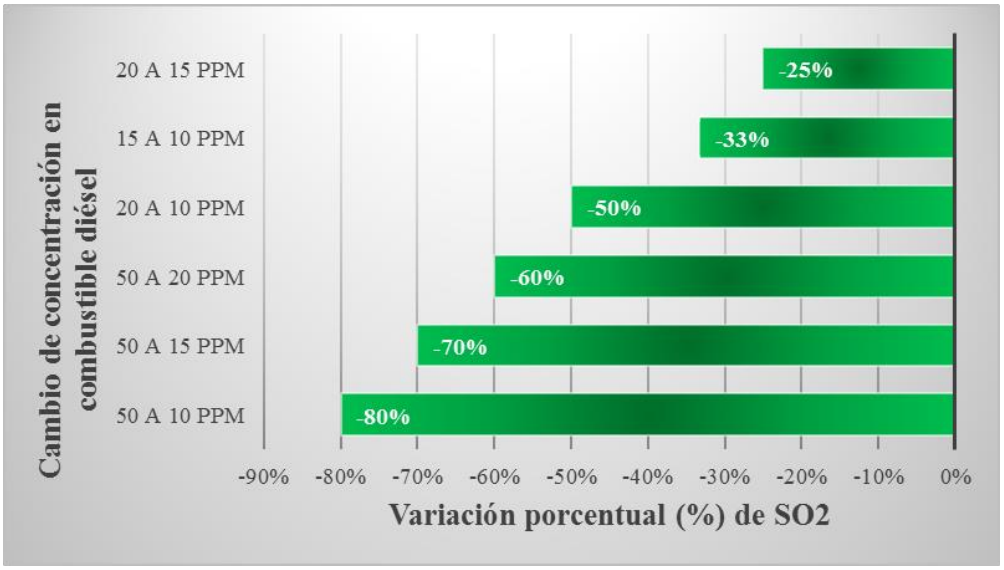


Figura 3. Variación porcentual (%) de SO2 para todas las tipologías de MMNC en función de la reducción de la concentración de azufre (ppm) en el combustible diesel (Ocampo, 2020)

A partir de las reducciones de concentración de azufre en el combustible diesel utilizado en la primera estrategia, se analiza que al aplicar estas reducciones de azufre en segmentos de MMNC con la segunda estrategia existe una reducción positiva de los contaminantes criterio, pues la reducción de concentración de azufre en el combustible diesel y la variación de niveles tecnológicos en ascenso por ejemplo de Tier 2 y Tier 3 a Tier 4, generan una variación porcentual de emisiones positiva (Disminución) y negativa (Aumento) así: HC y SO2 (0 a 83%), CO (-120 a 85%), NOx (-10 a 36%), CO_2 (0 a 15%), PM10, PM2.5 y BC (-26 a 92%). Además, se podría considerar que estos resultados se determinaron en función de la potencia de los motores de las diferentes tipologías de MMNC y las horas promedio de uso por lo que estos dos factores son esenciales para el cálculo de emisiones de contaminantes generados por este tipo de maquinaria.

Conclusiones

Se concluye que la segunda estrategia es la que más beneficios trae, ya que permite reducir porcentualmente las emisiones contaminantes de HC y SO_2 un 83%, CO un 85%, CO_2 un 15%, NOx un 36%, CO_2 un 15%, PM_{10} - $PM_{2.5}$ y BC hasta un 92%, pero esto solo se logra al realizar una reducción en la concentración de azufre en el combustible, situación que por supuesto con el paso de los años a la agenda de 2030 para Colombia esto deberá ser real según se establece en el CONPES 3943. Así pues, aunque se presentó aumento de emisiones en CO, NOx, PM_{10}, $PM_{2.5}$ y BC estos son relativamente bajos frente a las emisiones que actualmente se dan en los países de Latinoamérica, por lo que el primer paso para el mejoramiento de la calidad del aire, se encuentra en aplicar las investigaciones más eficaces, que como la presente contribuyan a establecer las mediciones y medidas de control pertinente de las emisiones de contaminantes atmosféricos – climáticos generadas en el sector agrícola, industrial y de construcción.

Agradecimientos: *Agradezco a Dios por los momentos que he vivido hasta este tiempo y por todos los que vendrán, se que sin Él nada de lo que he logrado hubiera sido posible, al profesor Juan Felipe Méndez, pues sin su especial contribución de conocimientos no hubiera podido alcanzar las metas de esta investigación. A mi familia y amigos que siempre han estado ahí para apoyarme, y por su puesto y no menos importante a mi madre Delia Consuelo Ocampo quien ha sido referente de todas mis metas vida y a quién siempre recuerdo en cada paso que doy por esta vida tan maravillosa.*

Referencias bibliográficas

CONAMA. (2011). *Brasil: Fuera de la carretera: Emisiones | Política de transporte*. https://www.transportpolicy.net/standard/brazil-nonroad-emissions-2/

Dallmann, T., & Menon, A. (2016). *Technology pathways for diesel engines used in non-road vehicles and equipment.* https://theicct.org/sites/default/files/publications/Non-Road-Tech-Pathways_white-%20paper_vF_ICCT_20160915.pdf

DANE. (2020). *Boletín Técnico Producto Interno Bruto (PIB)*. http://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-

EPA. (2018a). *Emission Standards for Nonroad Engines and Vehicles*. https://www.epa.gov/emission-standards-reference-guide/epa-emission-standards-nonroad-engines-and-vehicles

EPA. (2018b). *Exhaust and Crankcase Emission Factors for Nonroad Compression-Ignition Engines in MOVES2014b.* https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/P100UXEN.txt?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=2016 Thru 2020&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&UseQField=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=

European Environment Agency. (2019). *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook*. European Environment Agency. https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019

Geasur. (2013). *Elaboración de diagnóstico e inventario de emisión para maquinaria fuera de ruta*. http://d284f45nftegze.cloudfront.net/geasur/Resumen MFR.pdf

Lents, J.; Walsh, M.; He, K.; Davis, N.; Osses, M.; S, Tolvett y L, Hu, ; (2011). *Handbook of air quality management*. http://www.aqbook.org/read/?language=Sp

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018). *CONPES 3943 - Política para el mejoramiento de la Calidad del Aire - Colombia*. https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Económicos/3943.pdf

Ocampo, Y. (2020). *Análisis exploratorio de estrategias de reducción de emisiones de contaminantes atmosféricos y climáticos en maquinaria móvil no de carretera en Colombia*. https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/40161/yaocampoo.pdf?sequence=3&isAllowed=y

OMS. (2018). *Calidad del aire ambiente (exterior) y salud*. https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health

ACODAL
ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
65° CONGRESO INTERNACIONAL
Agua, Saneamiento, Ambiente y Energías Renovables
Bogotá - Colombia
Centro de Convenciones Ágora
Julio 13, 14 y 15 de 2022

Diseño de un Nano Aerogenerador.

D.A. Fernández[1*], H. Y. Piñeros[1]

[1]Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central, Bogotá.

**Diego Andrés Fernández Peña:* Bogotá, Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central Cl. 13 #16-74 –San Victorino,Bogotá, Cundinamarca. 111051. Colombia. Email: dafernandezp@itc.edu.co

Abstract

Currently the Colombian state promotes the use of renewable energy, this as a measure to climate change, the seedbed of Matter and Energy is working on the development of a mini wind turbine low power, this to develop a solution to both the problem indicated, as well as the current costs of energy, also seeks to make this solution available to Colombians, this research will help Colombians who wish to implement green energy development technology.

KeyWords: Energy, Power, Renewable Energy, Wind, Wind turbine.

Resumen

En la actualidad el estado colombiano promueve el uso de energía renovable, esto como una medida al cambio climático, el semillero de Materia y Energía trabaja en el desarrollo de un mini aerogenerador de baja potencia, esto para desarrollar una solución tanto a la problemática indicado, como también a los costos actuales de la energía, también se busca poder hacer que esta solución esté al alcance de los colombianos, esta investigación ayudara a los colombianos que deseen implementar tecnología de desarrollo energético verde.

Palabras clave: aerogenerador, energía, energía renovable, potencia, viento.

Introducción

Todas las instituciones gubernamentales del país y todas las instituciones internacionales recomiendan la producción de energía renovable en todos los sectores.

El asunto de las energías renovables en Colombia es estratégico ya que el sistema de generación de energía eléctrica es altamente vulnerable al cambio climático.

El 68,3 % es de origen hidráulico, recurso totalmente dependiente del clima, en particular nuestro país es bastante afectado por el fenómeno del niño con consecuencias serias para el suministro de energía como sucedió en el pasado.

En Colombia nos enfrentamos a continuos fallos de a red eléctrica, lo que ocasiona la mala calidad del servicio energético en el 2018 las interrupciones tuvieron un promedio de 37.7horas, en promedio un usuario experimenta un promedio de 48 interrupciones al año, aunque hay usuarios que experimentan hasta 600 interrupciones y con una duración de más de 1000 horas al año.

Justificación

Durante 2021, el precio promedio de la energía despachada en contratos para atender la demanda del consumo residencial y pequeños negocios (mercado regulado) fue de 248,42 COP/kWh, el cual registra un incremento de 26,6 % con respecto a 2020 que fue de 219,75 COP/kWh.(Valora Analitik, 2022) con el aumento del costo de la energía se hace indispensable trabajar en buscar formas de reducir lo, ya sea en un uso mas adecuado de esta o en generación de energía renovable.

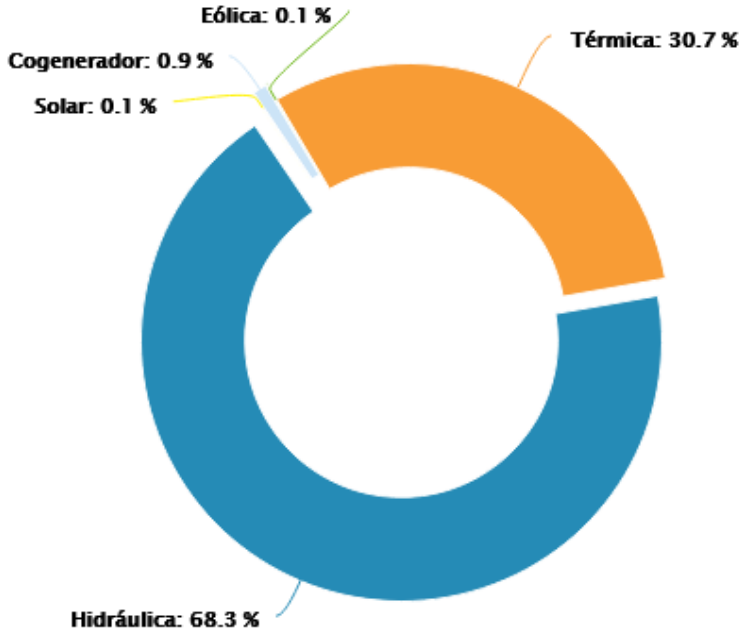
Colombia creo la política nacional del cambio climático donde este tiene “El objetivo de la Política nacional de cambio climático es incorporar la gestión del cambio climático en las decisiones públicas y privadas para avanzar en una senda de desarrollo resiliente al clima y baja en carbono, que reduzca los riesgos del cambio climático y permita aprovechar las oportunidades que este genera”.(Ministro de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

Marco teórico

Todas las instituciones gubernamentales del país y todas las instituciones internacionales recomiendan la producción de energía renovable en todos los sectores.

El asunto de las energías renovables en Colombia es estratégico ya que el sistema de generación de energía eléctrica es altamente vulnerable al cambio climático:

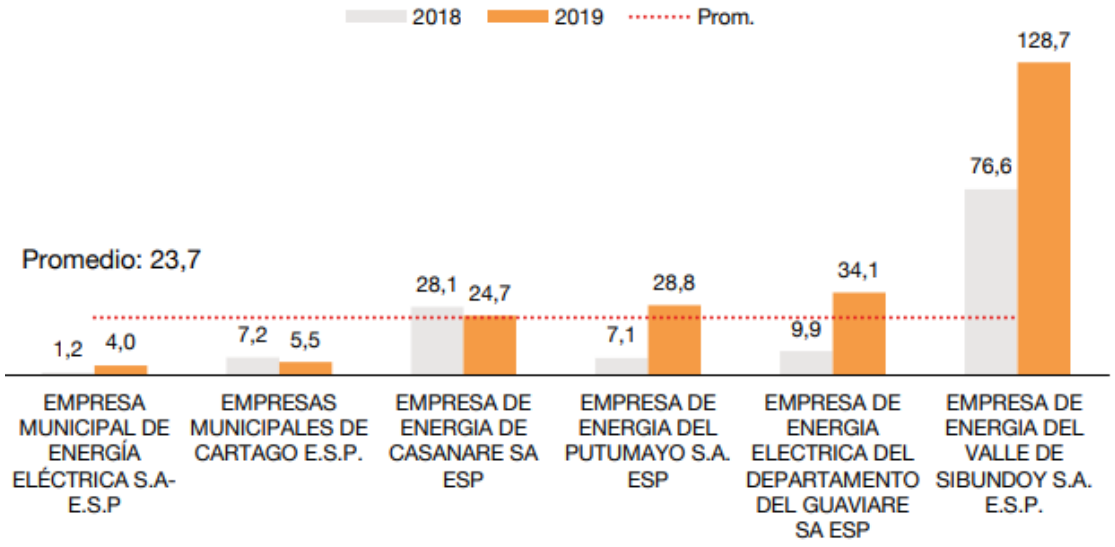
Figura 1



El 68,3 % es de origen hidráulico, recurso totalmente dependiente del clima, en particular nuestro país es bastante afectado por el fenómeno del niño con consecuencias serias para el suministro de energía como sucedió en el pasado.

En Colombia nos enfrentamos a continuos fallos de a red eléctrica, lo que ocasiona la mala calidad del servicio energético en el 2018 las interrupciones tuvieron un promedio de 37.7horas, en promedio un usuario experimenta un promedio de 48 interrupciones al año, aunque hay usuarios que experimentan hasta 600 interrupciones y con una duración de más de 1000 horas al año.

Figura 2 Indicadores Des 2019



Energía eólica

La energía eólica se ha convertido en una fuente de generación de electricidad clave para el cambio del modelo energético, más limpio y sostenible. La mejora de la tecnología permite que algunos campos eólicos produzcan energía eléctrica tan barata como lo hace el carbón o las centrales atómicas. (ANDREA, 2013)

Principales ventajas:

- **No emite gases contaminantes, ni residuos sólidos**
- **No utiliza agua**
- **Reduce emisiones de CO2**
- **No requiere minería de cielo abierto o de extracción subterránea**
- **Durante su explotación, los posibles incidentes no implican incidentes ambientales de gran impacto (derrames, explosiones, incendios, etc)**

- **Ahorra combustibles**
- **Diversifica el suministro de energía.**

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Realizar el diseño de un prototipo de aerogenerador eléctrico de pequeña potencia, que pueda ser aprovechado por las comunidades y los pequeños y medianos empresarios en cuyas localidades estén dadas las condiciones meteorológicas

OBJETIVOS ESPECIFICAOS

- Establecer el tipo y características del rotor, aspas y demás componentes a utilizar

- Estimar la potencia generada por el aerogenerador

- Calcular la eficiencia

- Determinar un diseño y construcción aplicable a comunidades empleando materiales, accesorios y equipos de fácil consecución

- Determinar los costos de diseño y fabricación óptimos y accesibles para las comunidades

- Determinar el potencial eólico mediante el empleo del equipo base para pruebas

ESTADO DEL ARTE

Sistemas aislados o en isla

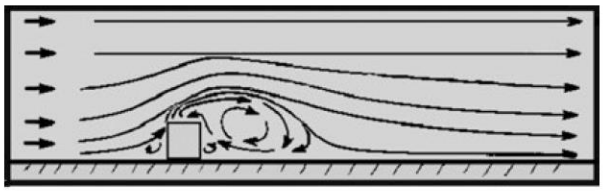
Es el sistema que se utiliza para pequeños aerogeneradores y es el perfecto para autogeneración de energía.(CASTELLANOS & LOPEZ, 2013)

Caracterización del potencial energético del viento

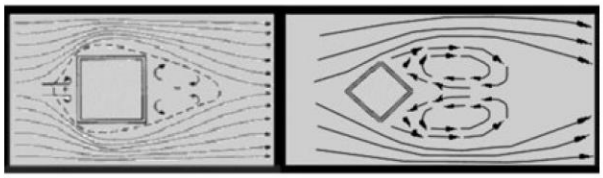
Influencia de obstáculos

Los obstáculos como edificios, árboles, etc, genera dos efectos negativos, la reducción de la velocidad del viento y la generación de turbulencias, a continuación, podemos observar la influencia de un obstáculo no aerodinámico sobre el flujo del viento y la gran turbulencia que produce a sotavento.

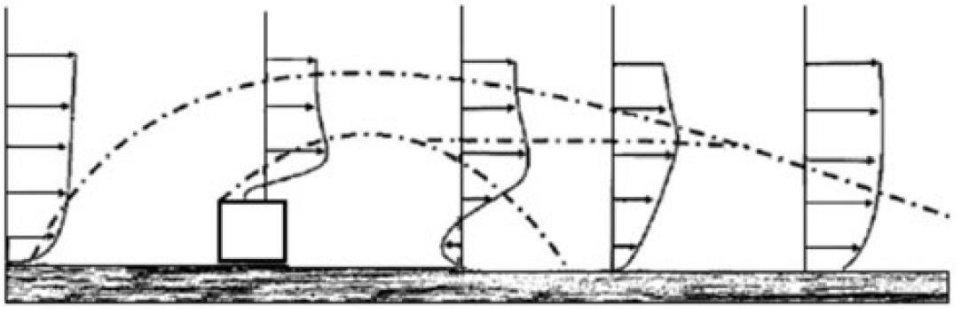
(vista lateral, en alzado)



(vista superior, en planta)



En la siguiente gráfica podemos ver la influencia de un obstáculo sobre el perfil vertical de la velocidad del viento.



Potencia eólica disponible

Energía cinética

Una masa de aire (m), con velocidad (v) posee una energía cinética Ec dada por la siguiente expresión:

$$E_C = \frac{m v^2}{2}$$

Caudal másico

La cantidad de masa de aire que fluye en la sección transversal (de diámetro igual al del aerogenerador) por unidad de tiempo se denomina relación **de flujo de masa** o **caudal másico** y se denota por:

$$\dot{m}$$

La relación de flujo de masa de aire que atraviesa el aerogenerador es proporcional al área de la sección transversal *A* del aerogenerador, a la densidad r y a la velocidad del aire que es una cantidad vectorial:

$$\vec{V}$$

La relación de flujo de masa a través de un área diferencial *dA* puede expresarse como:

$$d\dot{m} = \rho \vec{V}\, dA$$

Donde $\vec{V}$ es la componente de la velocidad del viento normal a *dA*

La relación de flujo de masa por toda el área de la sección transversal del aerogenerador se obtiene mediante integración:

$$\dot{m} = \int_A \rho \vec{V}\, dA$$

Las unidades son kilogramo sobre segundo

Haciendo la aproximación de que el aire tiene un **flujo unidimensional** es decir que sus propiedades varían en *una* dirección (la del flujo). Por otro suponemos que todas las propiedades son *uniformes* en toda la sección transversal normal a la dirección de flujo de aire. Asumimos también que la velocidad del viento será constante en toda la sección transversal del aerogenerador e igual a un valor promedio equivalente. Con todas estas aproximaciones podemos realizar la integral anterior para obtener:

$$\dot{m} = \rho V\vec{pro}\, A$$

Donde r es la densidad del aire en kilogramos sobre metro cúbico, Vpro es la velocidad promedio del aire normal al área *A* en metros sobre segundo y *A* es el área de la sección transversal del aerogenerador normal a la dirección del flujo de aire en metros cuadrados.(Villarrubia, 2013)

La potencia está definida como el cambio de la energía con respecto al tiempo, por lo tanto, a partir de la expresión para la energía cinética podemos definir la **potencia disponible Pd:**

$$P_D = \frac{\dot{m} v^2}{2}$$

Esta definición la podemos expresar en términos de densidad, área y velocidad:

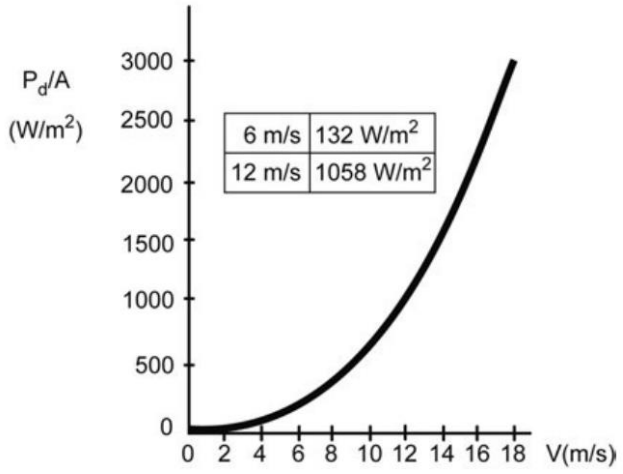
$$P_D = \frac{\rho A v^3}{2}$$

La potencia eólica disponible es la máxima potencia que se podría obtener del viento si se le pudiera extraer toda su energía cinética. Debido a limitaciones de diferente tipo solo se puede extraer hasta el 50% de esta potencia.

Podemos definir una densidad de potencia disponible o potencia disponible por unidad de área así:

$$\frac{P_D}{A} = \frac{\rho v^3}{2}$$

La siguiente figura muestra la variación de la densidad de potencia eólica disponible en función de la velocidad, calculada para la densidad de aire estándar (1,225 Kg/m3), temperatura 15 °C y presión atmosférica de 1.013 mbar.(Villarrubia, 2013)



De las expresiones de la potencia disponible, de la densidad de potencia y del anterior gráfico podemos concluir los siguientes puntos:

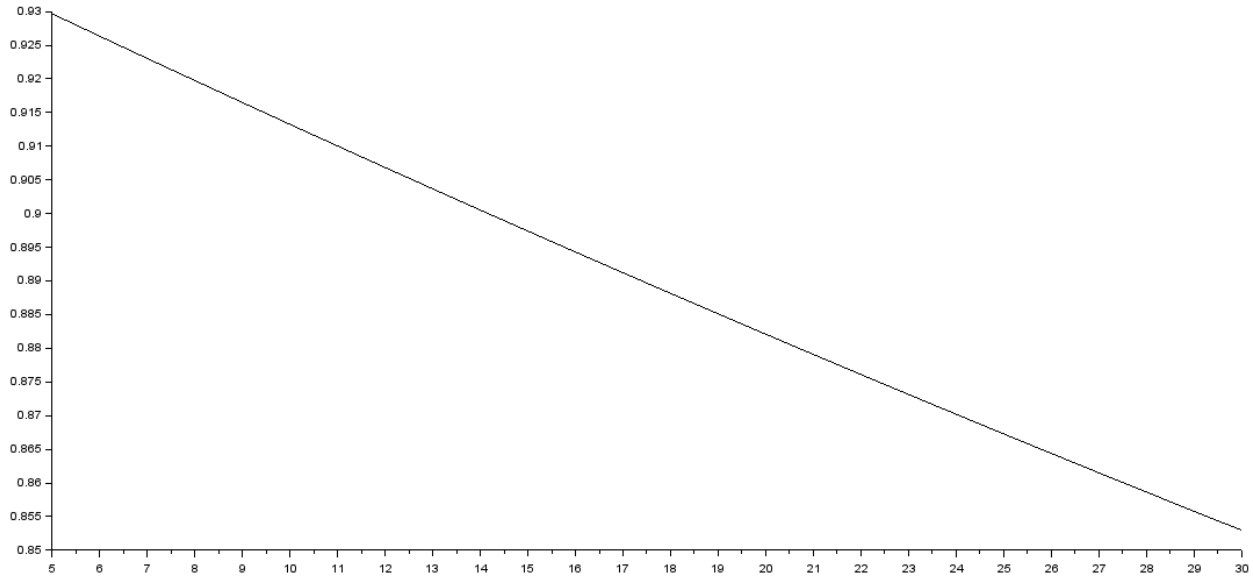
- **La densidad de potencia depende del cubo de la velocidad. Si la velocidad aumenta un 10%, la densidad de potencia crece en 33%. Por lo tanto, hay que elevar el aerogenerador todo lo que sea posible sobre el nivel del suelo ya que la velocidad tiende a aumentar con la altura y se limitan a su vez las turbulencias.**
- **La potencia eólica disponible es directamente proporcional al área del aerogenerador, es decir al cuadrado del diámetro del círculo barrido por las palas, por ello si se duplica el diámetro del rotor, energía que pudiere obtenerse se multiplica por un factor de cuatro.**
- **Tanto la potencia eólica disponible como la densidad de potencia dependen linealmente de la densidad del aire. Para estimar la densidad del aire en función de la temperatura y altitud sobre el nivel del mar se puede utilizar la siguiente expresión:**

$$\rho = 1{,}225\left(\frac{288}{T+273}\right)e^{-\left(\frac{h}{8435}\right)}$$

Para el caso de la ciudad de Bogotá la altura es 2625 metros sobre el nivel del mar. Por lo tanto, la densidad en función de la temperatura para la ciudad de Bogotá se puede expresar de la siguiente manera:

$$\rho = 0.8974\left(\frac{288}{T+273}\right)$$

La gráfica de la anterior expresión para una temperatura entre 5 y 30 °C en el eje horizontal, en el eje vertical tenemos la densidad en Kg/m3



Por ello entre más frío este el aire más potencial de entregar energía tiene.

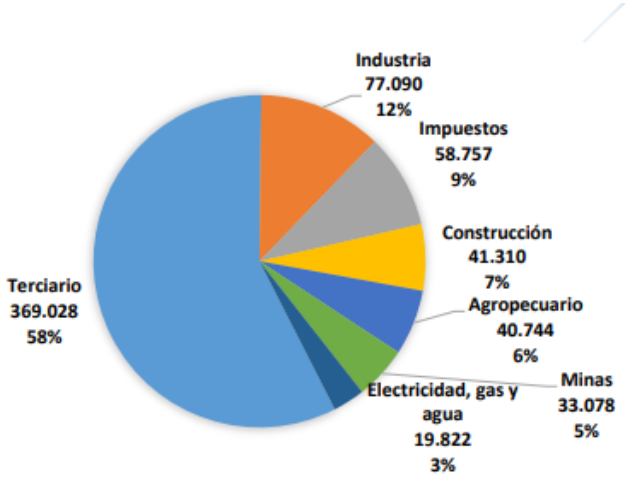
1. Planteamiento del problema

1.1.1. Antecedentes

El encarecimiento de los combustibles fósiles y el gravísimo impacto de esta tecnología, obligan al desarrollo de fuentes de energía renovable para la producción de electricidad.

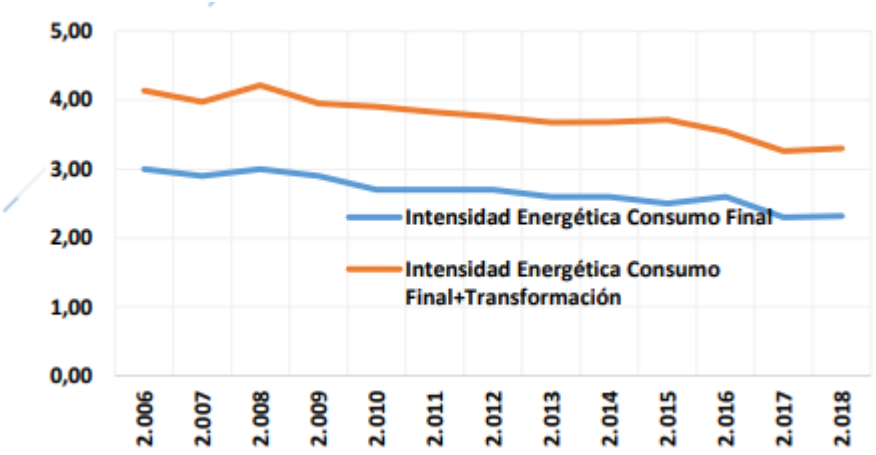
“el consumo de energía y la capacidad de producción de la economía”11 , en éste caso el indicador se calculó tomando como base la información de consumo final de energía (TeraJulios) del BECO, y la información de Producto Interno Bruto - PIB base 2005 (miles de millones de COP)(*PLAN ENERGÉTICO NACIONAL 2020- 2050*, 2019)

Figura 3 Distribución del Producto Interno Bruto hasta el III trimestre de 2019 (miles de millones de pesos – año base 2015)



Fuente: DANE

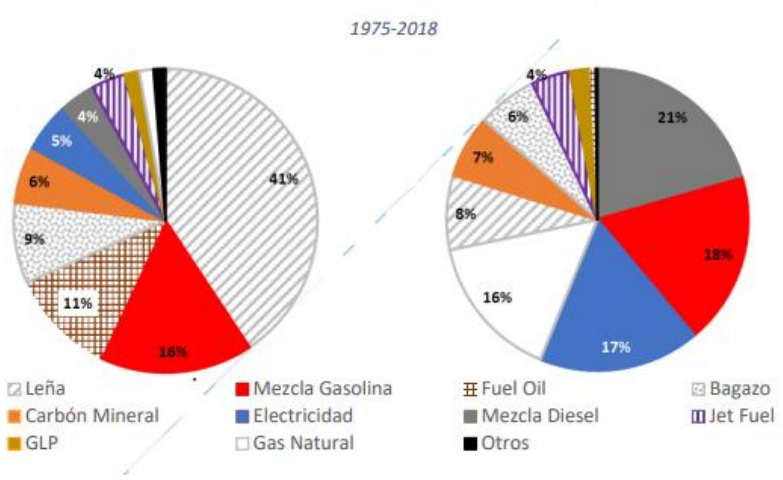
Figura 4 Intensidad Energética en Consumo Final (TJ/miles de millones de COP – Base 2005)



Fuente DANE

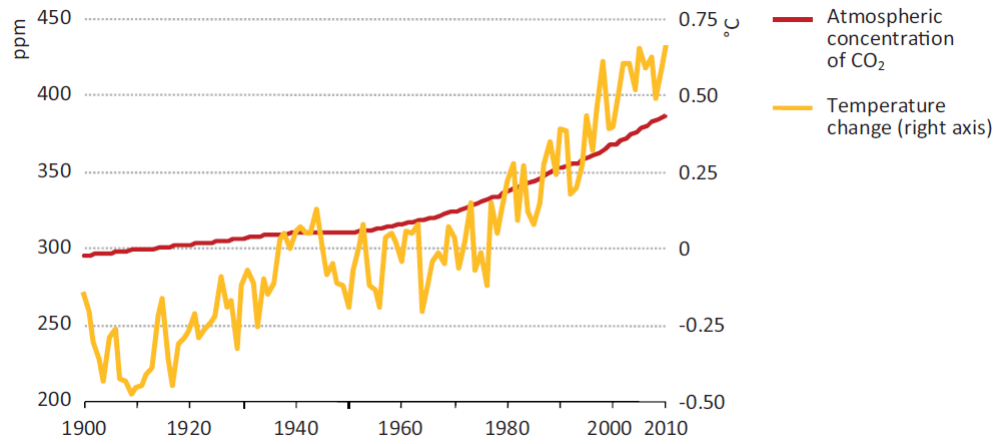
Es irrefutable el impacto de los combustibles fósiles en la temperatura del planeta," Los combustibles fósiles comprenden el 80% de la demanda actual de energía primaria a nivel mundial y el sistema energético es la fuente de aproximadamente dos tercios de las emisiones globales de CO2."(Elzinga, n.d.) Si continúan las tendencias actuales, o dicho de otra manera, si la proporción actual de combustibles fósiles se mantiene y la demanda energética casi se duplica para 2050, las emisiones superarán enormemente la cantidad de carbono que se puede emitir si se ha de limitar el aumento medio de temperatura a nivel mundial a 2^0 C.(Elzinga, n.d.)

Figura 5 Participación porcentual de fuentes de energía en la composición de la oferta, 1975-2018



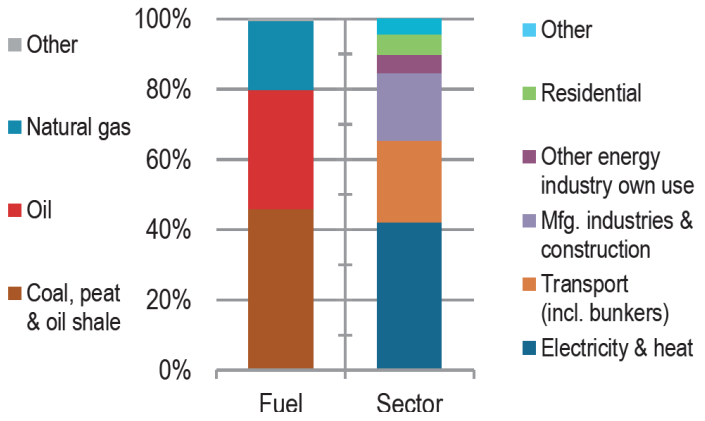
Fuente DANE

Figura 6 Concentración atmosférica de CO_2



La producción de energía eléctrica produce más del 40 % de las emisiones de CO2 y el carbón es el combustible que genera más del 40% de las emisiones de CO2, Se estima que la cadena de valor del combustible fósil emite 110 millones de toneladas de metano al año en la producción y el uso de gas natural, carbón y petróleo. Esto representa una gran proporción de todas las emisiones de metano. Al ser un potente gas de efecto invernadero, se deben reducir considerablemente las emisiones de metano. (Elzinga, n.d.)

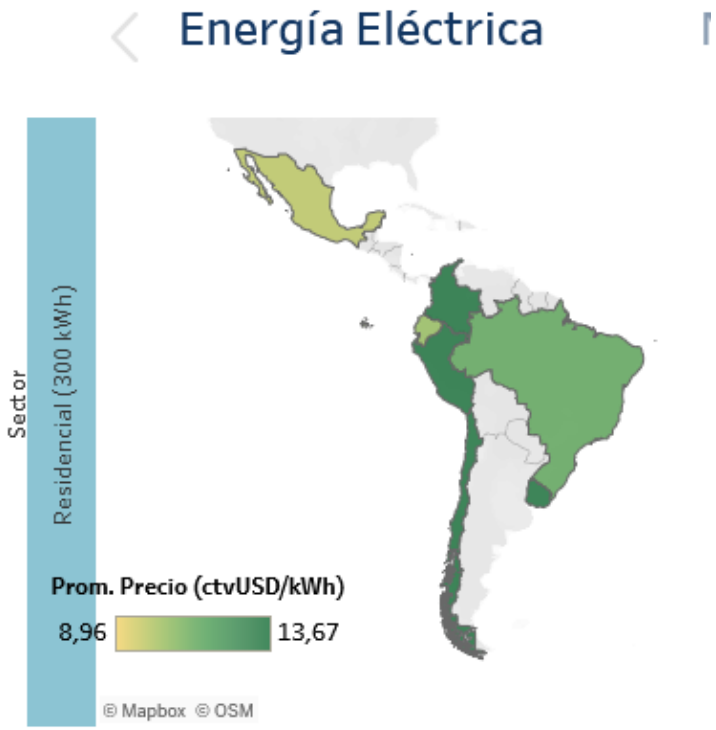
Figura 7 Emisiones de CO2



La energía eléctrica en Colombia es una de las más costosas de la región. Una de las principales causas es la composición de la canasta energética que presiona los precios al alza. El 70% de la energía se abastece de fuentes muy eficientes como agua y carbón, pero el 30% con fuentes más costosas, entre ellas con combustibles líquidos. La energía de respaldo está programada básicamente con combustibles líquidos o con gas y entre esas generadoras hay muchísimas que tienen unos costos extremadamente altos.(Portafolio, 2019) Para Bogotá existe un IVA diferencial que fluctúa entre 14% y 13%. A partir de febrero 2017 el Iva es un 19%.(Latina & Caribe, n.d.)

Figura 8 Precios de los principales energéticos en Colombia, corte 2018

Energético	IVA %	Impuestos Especiales	Precio
GLP (residencial)	---	---	0.86 USD/kg
Keroseno residencial	19 %	---	0.62 USD/l
Gasolina corriente	19 %	Sí	0.73 USD/l
Gasolina premium	19 %	Sí	0.96 USD/l
Diésel	19 %	Sí	0.69 USD/l
Fuel oil (industrial)	19 %	---	0.39 USD/l



La proyección es que el costo siga aumentando, la necesidad de prender centrales termoeléctricas está encareciendo el precio de la energía eléctrica. El último reporte de la consultora Antuko señala que el precio promedio semanal de la Bolsa de Energía subió 20 dólares el MWh, en lo que va del 25 al 31 de mayo, estacionándose en los 113 dólares por MWh. De persistir esta situación según predicciones de la consultora Enersinc, en marzo del año que viene el valor podría rondar los 420 pesos por kWh; es decir, unos 120 dólares por MWh, Cabe recordar que el precio del barril de crudo Brent pasó de costar menos de 17 dólares en abril y que a principios de este mes ya supera los 40 dólares. Según previsiones podría seguir subiendo.(*Estiman Que En Marzo de 2021 El Precio Promedio de La Energía Rondará 120 Dólares Por MWh En Colombia - Energía Estratégica*, n.d.)

Figura 9

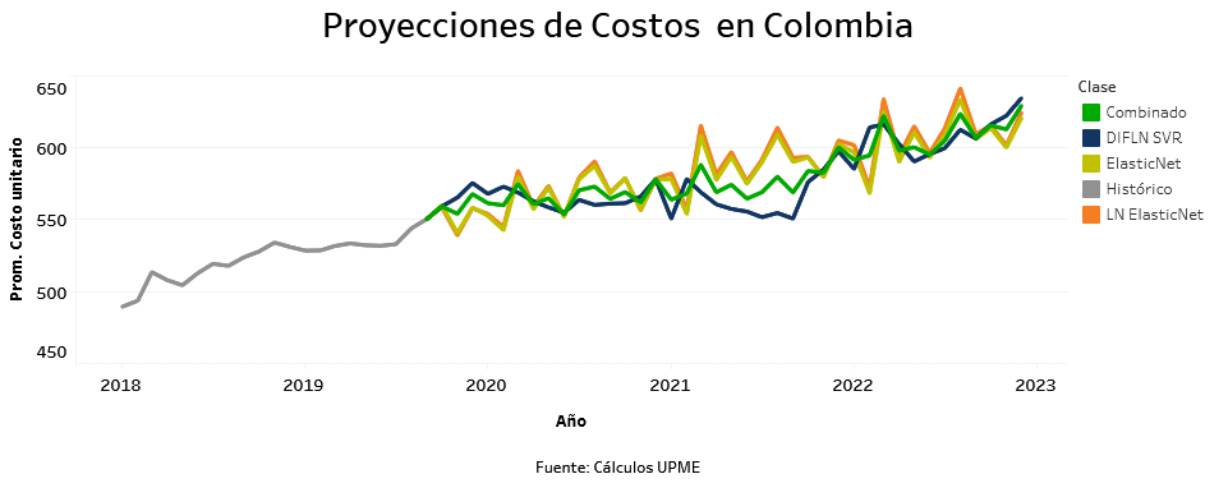


Figura 10 Tarifas de energía eléctrica aprobadas por la CREG julio 2021

SECTOR RESIDENCIAL NIVEL DE TENSIÓN 1				
ESTRATO (E)	RANGO DE CONSUMO (kWh-mes)	PROPIEDAD DE CODENSA ($/kWh)	PROPIEDAD DEL CLIENTE (*) ($/kWh)	PROPIEDAD COMPARTIDA (*) ($/kWh)
E1	0-CS (+)	232,1011	216,3636	224,7297
	Más de CS	580,2527	540,9089	561,8243
E2	0-CS (+)	290,1264	270,4545	280,9122
	Más de CS	580,2527	540,9089	561,8243
E3	0-CS (+)	493,2148	459,7726	477,5507
	Más de CS	580,2527	540,9089	561,8243
E4	Todo consumo	580,2527	540,9089	561,8243
E5	Todo consumo	696,3032	649,0907	674,1892
E6	Todo consumo	696,3032	649,0907	674,1892

(+) CS: Consumo de Subsistencia

Generación centralizada contra generación distribuida

Centralizada

Tradicionalmente la generación de energía eléctrica se ha basado en el concepto de grandes centros de generación alimentando grandes cargas y normalmente la distancia entre los generadores y las cargas es grande y en ocasiones muy grande.

Distribuida

En Colombia empezaron a desarrollarse centrales de generación térmica al norte del país, dentro de la zona caribe, cerca de los puertos sobre la costa atlántica, así como centrales de generación hidroeléctrica en la región andina, donde los recursos hídricos y los accidentes geográficos permitieron la utilización de caídas de agua para tal fin; todos estos proyectos se ubicaron en zonas cercanas a las principales urbes del territorio colombiano. (Miguel et al., 2008)

La generación centralizada adolece de varias deficiencias:

1. Cada uno de los proyectos centralizados es diferente, exigiendo cada vez un diseño y una construcción exclusiva. Se necesitan extensos y a veces extensísimos terrenos, cada vez las poblaciones se niegan más a que se construya en sus alrededores tanto proyectos como líneas de transmisión. El tiempo de estos proyectos también es elevado.
2. El esquema de generar energía lejos del centro de consumo obliga a mantener una larga red de Transmisión y distribución, la cual consta de líneas y transformadores. Todos estos elementos introducen pérdidas de energía. Para el año 2019 las pérdidas fueron de 948,5 GWh exclusivamente en el sistema de transmisión colombiano.
3. Entre más centralizado sea un sistema, es más susceptible de fallar dado que hay menos generadores para atender la demanda
4. Globalmente hay 1800 millones de personas sin acceso a energía eléctrica. La mayoría de ellos viven en países menos desarrollados. Llevar extensas redes de transporte a áreas remotas hace que su construcción, operación y mantenimiento resulte muy costoso.

El paradigma de la generación distribuida plantea que la generación se haga lo más cerca posible a la carga, inclusive en el mismo sitio que la carga y que se distribuya de la forma más parecida a como está distribuida la carga. Este planteamiento redunda inmediatamente en que los generadores sean cada vez más pequeños y que la distancia entre generador y carga se disminuya al máximo posible. Las energías renovables son naturalmente afines a la filosofía de la generación distribuida, es más sentaron la base para que pueda hacerse realidad.

Metodología

El diseño se desarrolla de manera descriptiva – cuantitativa, los datos recopilados son investigación de campo y la toma de datos se desarrolla en el punto de ubicación del aerogenerador.

La toma de datos se preparará teniendo en cuenta la estación climática que se dispondrá en los posibles lugares del aerogenerador.

Se tendrá una descripción minuciosa de las implicaciones de variar la altura del dispositivo, se buscará tener una relación de producción energética y área de control de paso de aire.

Cronograma

	SEMANAS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ITEM	ACTIVIDAD												
1	REVISION DE PRINCIPIOS FISICOS APLICABLES AL DISEÑO Y CONSTRUCION DEL PROTOTIPO DE AEROGENERADOR												
2	ELABORACION DE HIPOTESISI ACERCA DEL DISEÑO												
3	LISTADO DE MATERIALS E INSUMOS PARA LA CONSTRUCCION DE UN PROTOTIPO. ELABORACION DE COSTOS												
4	DETERMINAR Y CONSTRUIR EL SISTEMA DE SOPORTE (PLATAFORMA DE MONTAJE DE AEROGENERADOR Y ANCLAJE)												
5	ENSAMBLAJE CONJUNTO ALABES Y EJE												
6	ENSAMBLAJE DEL CONJUNTO ALABES A MAQUINA ELECTRICA DETERMINAR SISTEMA DE TRASNMISION												
7	MONTAJE DEL CONJUNTO AEROGENERADOR EN PEDESTAL												
8	PRUEBAS Y PUESTA EN MARCHA DEL PROTOTIPO												
9	MEDICIONES DE PARAMETROS CON INSTRTUMENTACION Y RESISTENCIAS												

Productos para entregar

Topología: Productos resultados de actividades de desarrollo Tecnológico e Innovación

Producto: Informe técnico.

Topología: Productos resultados de actividades de apropiación Social y conocimiento

Producto: Participación Redcolsi nacional

Producto: Jornada de socialización internacional virtual: presentación del proyecto al departamento de ingeniería electrónica de la universidad Autónoma del Estado de México (UAEM)

BIBLIOGRAFÍA

ANDREA, M. C. P. (2013). *ENERGÍA EÓLICA: VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE SU UTILIZACIÓN EN COLOMBIA*.

CASTELLANOS, C. A. B., & LOPEZ, J. D. C. (2013). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA DE BOMBEO DE AGUA, MEDIANTE EL USO DE UN GENERADOR EÓLICO PARA UNA ZONA RURAL EN BOYACÁ CAMILO*.

Elzinga, S. F. y D. (n.d.). *El papel de los combustibles fósiles en un sistema energético sostenible | Naciones Unidas*. Retrieved August 21, 2021, from https://www.un.org/es/chronicle/article/el-papel-de-los-combustibles-fosiles-en-un-sistema-energetico-sostenible

Estiman que en marzo de 2021 el precio promedio de la energía rondará 120 dólares por MWh en Colombia - Energía Estratégica. (n.d.). Retrieved August 23, 2021, from https://www.energiaestrategica.com/predicen-que-para-marzo-del-2021-el-precio-promedio-de-la-energia-en-colombia-rondara-los-120-dolares-por-mwh/

Latina, A., & Caribe, E. (n.d.). *Precios de la Energía en*.

Miguel, J., González, M., Alberto, C., Daza, D., Humberto, C., & Urueña, G. (2008). Análisis del esquema de generación distribuida como una opción para el sistema eléctrico colombiano Distributed generation scheme analysis as an option for colombian electrical system. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia N.°*, *44*, 97–110.

PLAN ENERGÉTICO NACIONAL 2020- 2050. (2019). https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/PEN_documento_para_consulta.pdf

Portafolio. (2019). *Precio de la electricidad en América Latina (2021) • Centro Mexicano de Relaciones Internacionales*. https://cemeri.org/mapas/precio-electricidad-america-latina/

Villarrubia, M. (2013). Ingenieria de la Energía Eólica. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Issue 9).

ACODAL
ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
65° CONGRESO INTERNACIONAL
Agua, Saneamiento, Ambiente y Energías Renovables
Bogotá - Colombia
Centro de Convenciones Ágora
Julio 13, 14 y 15 de 2022

Procesos de gobernanza del agua relacionados con proyectos de hidrocarburos en Colombia

Diana Morales Rozo[1], Víctor Leonardo López Jiménez[2*]

[1] Ingeniera Ambiental y Sanitaria –Facultad de Ingeniería. Universidad de La Salle. Bogotá D.C., Colombia
Email: dmoralesrozo@gmail.com

[2*]. Meteorólogo, MsC Desarolo Ambiental –Facultad de Ingeniería. Universidad de La Salle. Bogotá D.C., Colombia Email: vlopez@unisalle.edu.co

Resumen

Los proyectos de hidrocarburos en Colombia tienen cierta incidencia en las comunidades en las que se realizan intervenciones, siendo este uno de los aspectos a tener en cuenta en la gobernanza del agua. El presente artículo presenta ~~los~~ resultados de los procesos de gobernanza del agua relacionados con proyectos en este sector en Colombia, mediante la metodología PESTEL, mostrando resultados a favor y en contra en diferentes partes del país, donde el recurso hídrico, la participación comunitaria de grupos sociales y los intereses gubernamentales tienen un papel muy importante a la hora de tomar decisiones en pro del desarrollo sostenible.

Palabras claves: gobernanza del agua, hidrocarburos, normatividad ambiental, participación comunitaria, recurso hídrico, medio ambiente.

Abstract

Hydrocarbon projects in Colombia have a certain impact on the communities in which interventions are carried out, this being one of the aspects to be taken into account in water governance. This article presents the results of water governance processes related to projects in this sector in Colombia, using the PESTEL methodology, showing results for and against in different parts of the country, where water resources, community participation of groups Social and government interests play a very important role in making decisions for sustainable development.

Key Words: water governance, hydrocarbons, environmental regulations, community participation, water resources, environment.

Introducción

El concepto de gobernanza del agua, se define como los procesos de coordinación y cooperación de diversos actores sociales, sectoriales e institucionales que participan en su gestión integrada, incluyendo la cuenca y el territorio como entes fundamentales en este proceso, con el objetivo de impedir que el recurso hídrico[1] y sus dinámicas se conviertan en amenazas para las comunidades, y de garantizar la integridad y diversidad de los ecosistemas, para asegurar la oferta hídrica y los servicios ambientales. (MADS, s.f). La gobernanza deberá incluir acciones encaminadas a lograr una distribución equitativa del recurso que consiga aumentar las condiciones de vida de las poblaciones sin que se ponga en riesgo su disponibilidad y sostenibilidad. En la gestión del agua, coexiste una

[1] Se entiende por recurso hídrico todas las aguas superficiales continentales y aguas marinas costeras. Decreto 1075 de 2015. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Bogotá, D.C., Colombia

variedad de intereses y actores con responsabilidades distribuidas entre las diferentes instancias. De igual manera, la gestión del agua cuenta con diversos vínculos en la toma de decisiones en otras áreas de gestión, como la ordenación del territorio, la gestión del medioambiente y el transporte, entre otros. (WGC, 2013).

Este concepto está siendo liderado en Colombia por el actual Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) y está comprendido en el marco de la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (PNGIRH), que reúne un conjunto de acciones que involucran, tanto a instituciones públicas, como a privadas para la gestión del agua, con el fin de garantizar su disponibilidad, distribución y calidad para los todos los habitantes del país.

De lo anterior, se deriva que la gobernanza del agua es una capacidad que se debe adquirir en todos los niveles de la sociedad y debe ser de revisión constante, con el fin de garantizar la sostenibilidad del recurso hídrico según la dinámica de los actores involucrados en un determinado lugar. Por esta razón, se considera como gobernanza del agua, el conjunto de acciones encaminadas a lograr una distribución equitativa del recurso que conduzcan al mejoramiento de las condiciones de vida de las poblaciones, sin que se ponga en riesgo su disponibilidad.

Es así como, el objetivo central de este artículo es describir los procesos que hacen parte de la gobernanza del agua en los proyectos del sector de hidrocarburos, mediante el análisis de casos reales donde los resultados se muestran a favor y en contra de la gobernanza del agua. Para alcanzar el objetivo central se formularon tres objetivos específicos el primero, es identificar la incidencia que tiene el recurso hídrico en el sector de hidrocarburos (relacionado con los antecedentes y las

acciones ejecutadas de la actividad petrolera, normatividad ambiental vigente, estudios ambientales y usos del recurso hídrico en las fases del sector). El segundo, está asociado a la conceptualización actual de la gobernanza del agua: gestión integral del recurso hídrico, Política Nacional de Gestión Integral del Recurso Hídrico, oferta hídrica en Colombia y las consecuencias del Fenómeno del Niño en el país. Por último, se planteó la identificación de mecanismos de participación ciudadana que involucran la gobernanza del agua en la toma de decisiones de proyectos del sector de hidrocarburos analizando desde las dimensiones según el método PESTEL

Introducción

Contexto del recurso hídrico

De acuerdo con ~~a~~ la Asociación Mundial para el Agua (GWP, por sus siglas en inglés), la gestión integral del recurso hídrico se entiende como "un proceso que promueve el desarrollo y la gestión del agua, la tierra y los recursos relacionados a fin de maximizar el bienestar económico y social resultante de una manera, sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales" (GWP, 2000). La gobernanza del agua es por tanto un proceso de articulación de políticas, directrices, intereses, retos y perspectivas entre los diversos actores en torno a un fin común considerando la dimensión política, social, económica y ambiental de la gestión hídrica.

La Gestión Integral del Recurso Hídrico (GIRH) debe verse como un enfoque global del desarrollo y la gestión del agua, ya que esta trata tanto la gestión del recurso en sí como el marco de prestación de los servicios hídricos. Es así como el

concepto de gobernanza del agua comprende cuatro dimensiones, las cuales están enmarcadas en la GIRH:

- Social: se refiere a un uso equitativo del recurso hídrico, con el fin de que los diferentes actores sociales tengan acceso al recurso en cuanto a la calidad y a la cantidad del agua para el consumo humano y doméstico, así como en los usos relacionados con la producción: ganadería, pesca, riego, etc.
- Económica: está relacionada, tanto con uso eficiente del recurso hídrico, como con el papel del agua en relación con el crecimiento económico global.
- Política: iguales oportunidades democráticas en los diferentes grupos sociales, para influir en los procesos políticos y sus resultados, así como en la toma de decisiones relacionadas con el agua, favoreciendo las instituciones y aumentando las capacidades para promover sus intereses hídricos ante el resto del mundo.
- Ambiental: uso sostenible del recurso hídrico y su relación con la integridad y equilibrio del ecosistema. (PNUD, 2012)

En el *Plan Nacional de Desarrollo 2014 – 2018: Todos por un nuevo país*, en el numeral X Crecimiento verde[2], se plantean acciones en torno a la gestión integral del recurso hídrico en el marco de la PNGIRH, dentro de las cuales se encuentran la realización de las evaluaciones regionales del agua (ERA), planes de ordenamiento del recurso hídrico, programa de aguas subterráneas, Programa de

[2] Se define como el fomento del crecimiento y el desarrollo económico, al tiempo que se asegura que los bienes naturales continúan suministrando los recursos y servicios ambientales de los cuales depende nuestro bienestar. Para lograrlo, debe catalizar inversión e innovación que apuntalen el crecimiento sostenido y abran paso a nuevas oportunidades económicas. PND 2014 – 2018: Todos por un nuevo país. Departamento Nacional de Planeación, 2015.

Cultura del Agua, Participación y Manejo de Conflictos relacionados con el recurso hídrico, fortalecimiento del Centro Nacional de Modelación Hidrometeorológica a cargo del IDEAM, entre otros. (DNP, 2015)

A su vez, la Política se origina a partir de lo estipulado en el Plan Nacional de Desarrollo del periodo 2006 – 2010, con el fin de direccionar la gestión integral del recurso hídrico, incluyendo las aguas superficiales, subterráneas y marinas, como también constituir los objetivos y las estrategias para el uso y el aprovechamiento eficiente del agua, la prevención y control de la contaminación hídrica, considerando los aspectos sociales, ambientales y económicos involucrados en dicha gestión (MAVDT, 2010). El objetivo general de la política es:

> "Garantizar la sostenibilidad del recurso hídrico, mediante una gestión y un uso eficiente y eficaz, articulados al ordenamiento y uso del territorio y a la conservación de los ecosistemas que regulan la oferta hídrica, considerando el agua como factor de desarrollo económico y de bienestar social, e implementando procesos de participación equitativa e incluyente (PNGIRH, 2010).

Dentro de esta Política, se establecen seis objetivos específicos que integran aspectos importantes como lo son la oferta y demanda del recurso hídrico, la calidad, el riesgo, el fortalecimiento institucional. Cabe resaltar que la gobernabilidad hace parte de uno de éstos objetivos específicos que dice:

"Consolidar y fortalecer la gobernabilidad[3] *para la gestión integral del recurso hídrico"*. El propósito de este objetivo es alcanzar el cumplimiento de la política para la consolidación y el fortalecimiento en relación con la gestión integral del recurso hídrico bajo las estrategias de participación, cultura del agua y manejo de conflictos. (MAVDT, 2010). Los principios que hacen parte de esta Política se fundamentan en: Bien de uso público, uso prioritario, factor de desarrollo, integridad y diversidad, unidad de gestión, ahorro y uso eficiente, participación y equidad, información e investigación.

La Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico tiene un horizonte de 12 años (2010- 2022) y para su desarrollo se establece ocho principios y seis objetivos específicos. Para alcanzar dichos objetivos se han definido estrategias en cada uno de ellos y directrices o líneas de acción estratégicas que definen el rumbo hacia donde deben apuntar las acciones que desarrollen cada una de las instituciones y de los usuarios que intervienen en la gestión integral del recurso hídrico, en la formulación de la política se elaboró un documento de Diagnóstico que establece la base técnica que la soporta y en donde se refleja en detalle el estado actual del recurso hídrico en el país.

Mecanismos de participación relacionados con gobernanza

De acuerdo a la Constitución Política de Colombia proclamada en el año de 1991, dentro de los principios fundamentales (art. 2), el Estado debe servir a la comunidad, facilitar la participación de todos en las decisiones que los afectan y en

[3] Se define como un proceso que considera la participación a múltiples niveles más allá del Estado, en donde la toma de decisiones incluye no solamente a las instituciones públicas, sino a los sectores privados, organizaciones no gubernamentales y la sociedad civil en general". Fuente: Centro del Tercer Mundo para el Manejo del Agua, México,

la vida económica, política, administrativa y cultural de la Nación; defender la independencia nacional, mantener la integridad territorial y asegurar la convivencia pacífica y la vigencia de un orden justo. Dentro de los deberes y obligaciones de los ciudadanos, se contempla la protección de los recursos naturales del país y velar por la conservación de un ambiente sano (art. 95).

Dentro de la protección y aplicación de derechos, la sociedad tiene un papel muy importante dado que podrá reclamar ante los jueces la protección inmediata de sus derechos constitucionales fundamentales ya sea que se estén vulnerando o se vean amenazados o por la omisión de cualquier autoridad pública (art. 86), y por otro lado, tiene el derecho de acudir ante las entidades competentes para hacer efectivo el cumplimiento de una ley o un acto administrativo (art. 87).

En cuanto al marco regulatorio de ambiental en Colombia, la Constitución establece en su artículo 79 "*Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo*". En el artículo 80 "*El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución"*.

Posterior a la Constitución, en la Ley 99 de 1993[4], se da la directriz para intervenir en procedimientos administrativos ambientales (art. 69). Cualquier persona natural o jurídica o privada, sin necesidad de demostrar interés jurídico

[4] Por la cual se crea el ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones.

alguno, podrá intervenir en las actuaciones administrativas *iniciadas para la expedición, modificación o cancelación de permisos o licencias de actividades que afecten o puedan afectar el medio ambiente o para la imposición o revocación de sanciones por el incumplimiento de las normas y regulaciones ambientales.*

El Congreso de Colombia en el año 1994 expide la Ley 134 por la cual se dictan normas sobre mecanismos de participación ciudadana para la toma de decisiones. A continuación, se presenta una síntesis de los diferentes mecanismos de participación y su relación con la vulneración de derechos colectivos y fundamentales, en el cual se involucra el uso y aprovechamiento de recursos naturales a ser intervenidos para ejecutar un proyecto que afecte los intereses particulares de una comunidad:

Tabla 1 Mecanismos de participación ciudadana en Colombia

Mecanismo de participación	Objeto	Normativa aplicable
Acción popular	Las acciones populares se ejercen para evitar el daño contingente, hacer cesar el peligro, la amenaza, la vulneración o agravio sobre los derechos e intereses colectivos, o restituir las cosas a su estado anterior cuando fuere posible. (Ley 472/1998, art. 2)	• Constitución Política de Colombia, art. 86 y 88 • Ley 99/1993 art. 75 • Ley 472/1998
Acción de tutela	Defensa de los derechos fundamentales	• Constitución Política de Colombia, art. 86 y 88
Audiencia pública ambiental	Cualquier persona natural o jurídica o privada, sin necesidad de demostrar interés jurídico alguno, podrá intervenir en las actuaciones administrativas iniciadas para la expedición, modificación o cancelación de permisos o licencias de actividades que afecten o puedan afectar	• Ley 99/ 1993 art. 69-72 • Dec. 2762/2005 • Dec. 330 / 2007

	el medio ambiente o para la imposición o revocación de sanciones por el incumplimiento de las normas y regulaciones ambientales (Ley 99 / 1993,	
Acción de cumplimiento en asuntos ambientales (actual procedimiento sancionatorio ambiental)	El Estado es el titular de la potestad sancionatoria en materia ambiental y la ejerce sin perjuicio de las competencias legales de otras autoridades a través del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Corporaciones Autónomas Regionales, las de Desarrollo Sostenible, y las Unidades Ambientales (Ley 1333/2009, art. 1)	• Ley 393 / 1997 • Ley 1333 / 2009
Consulta previa	Protección tanto de la identidad étnica como cultural de los grupos étnicos	• Convenio 169 de la OIT • Constitución Política de Colombia, art. 63,330 • Ley 99/1993 art. 75
Consulta popular	La consulta popular es la institución mediante la cual, una pregunta de carácter general sobre un asunto de trascendencia nacional, departamental, entre otros, es sometida por el Presidente de la República, el gobernador o el alcalde, según el caso, a consideración del pueblo para que éste se pronuncie formalmente al respecto. En todos los casos, la decisión del pueblo es obligatoria. (Ley 134/ 1994, art. 8)	• Ley 134 / 1994

Fuente: Elaboración propia, mediante la normatividad vigente colombiana a 2016.

Gobernanza del agua y su influencia en el sector de hidrocarburos

Como se puede evidenciar, la PNGIRH está planteada para atacar estas debilidades y trabajarlas con estrategias e indicadores que realmente reflejen avances en la gobernabilidad del recurso y la solución de conflictos. De igual manera, es destacable cómo las deficiencias en gobernabilidad del agua lo que

hacen es justamente acrecentar la problemática ambiental y la generación de conflictos como es el caso de la industria de los hidrocarburos, actividad fuertemente impulsada por el Estado, en el que se adjudican bloques exploratorios sobre territorios con particularidades socioambientales, y por las cuales durante la exploración se generan conflictos de interés asociados con el uso y afectación del agua.

Con relación a la oferta hídrica en Colombia, ésta es considerada como una de las más importantes del mundo, sin embargo, a un nivel de análisis regional y temporal es evidente que la disponibilidad del recurso es limitada y requiere de una gestión que derive en la gobernanza del agua, con el fin de garantizar la oferta y calidad del recurso. Según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia, en el Estudio Nacional del Agua, establece que la oferta hídrica del país no es homogénea, como consecuencia de la presencia de factores relacionados con la estructura socioeconómica y la vulnerabilidad en los ecosistemas. (IDEAM, 2014).

Con el Fenómeno del Niño, (2015-2016) el país enfrentó uno de los eventos más fuerte en los últimos años y de mayor sequía, dejando como consecuencias sin abastecimiento de agua a varios departamentos y municipios, realización de captaciones ilegales de agua potable y baja disponibilidad de agua en fuentes abastecedores de acueductos que surten agua a las comunidades; en varios ríos importantes como, por ejemplo, el Magdalena y Cauca se mantienen en los niveles bajos a lo largo de toda la cuenca. En efecto, dicho evento climático deja como secuelas muerte de peces y baja o nula productividad en el campo de los sectores ganaderos, agroindustria y ganadería, y grandes pérdidas de hectáreas de bosques por incendios.

Hasta el año 2004, la industria petrolera del país, no era de mayor relevancia, debido a los costos de la exploración y la baja financiación nacional para tal actividad, razón por la cual hasta esa fecha, los principales campos con yacimientos viables eran Caño Limón y Cupiagua. Con la creación de la ANH en el año 2003 y el mejoramiento de tecnologías en la cadena productiva de los hidrocarburos, Colombia creo un hito en la industria, con la firma de veintiún contratos de exploración y producción y siete contratos de evaluación técnica, esto llevó, dando como resultado que en el año 2012 se alcanzara una producción promedio de un millón de barriles por día (BPCD). Alcanzar estas cifras, generó grandes beneficios económicos al país, pero dejó costos sociales y ambientales importantes en muchas de las regiones en el que se han llevado a cabo la exploración, explotación y/o transporte de hidrocarburos, lo que ha desencadenado un sin número de conflictos ambientales, entre los que se destacan los relacionados con la contaminación de fuentes hídricas y la disminución en la disponibilidad del recurso.

La industria petrolera en Colombia ha sido el motor de la economía del país. El petróleo es el principal contribuyente a las finanzas del Estado y por otro lado, el primer producto de exportación con el 55.4% del total de las exportaciones (ANH, 2010). Sin embargo, la industria empezó a hacer implosión.

*E*l sector de hidrocarburos ha disminuido a gran escala sus actividades de exploración en los diferentes bloques en más de un 60% dando como resultado limitar la solicitud de licencias ambientales a la autoridad ambiental. En el año 2015, la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) en su informe de gestión reportó la recepción de 67 solicitudes asociados a trámites del sector de hidrocarburos dentro de los cuales el 52.2% corresponden a licencia ambiental,

32.8% modificaciones de licencia ambiental, 3% planes de manejo ambiental (PMA), 10.5% modificaciones a PMA y 1.5% a Diagnóstico Ambiental de Alternativas (ANLA, 2014). Mientras que en el año 2014, reportó un total de 79 solicitudes, de los cuales 55.7% corresponden a licencia ambiental, 32.9% modificaciones de licencia ambiental, 2.5% PMA, 3.8% modificaciones a PMA y 3.8% a Diagnóstico Ambiental de Alternativas y 1.3% a Medidas de Manejo ambiental (ANLA, 2014). Entre 2010 y 2014 se perforaron un promedio de 119 pozos exploratorios por año, mientras que, entre 2015 y 2019 el promedio disminuyó a 39 pozos anuales.

En cuanto a la normatividad ambiental colombiana, el MADS expidió la última actualización relacionada con licencias ambientales, mediante el Decreto 2041 de 2014[5], en el que se establecen unas directrices de carácter obligatorio para ciertos sectores a la hora de ejecutar un proyecto, obra o actividad[6] que presente cualquier alteración en el medio ambiental biótico, abiótico y socioeconómico, que sea adverso o beneficio, total o parcial; a su vez, indica que:

El Estudio de Impacto Ambiental (EIA) es el instrumento básico para la toma de decisiones sobre los proyectos, obras o actividades que requieren licencia ambiental y se exigirá en todos los casos en que de acuerdo con la ley y el presente reglamento se requiera (ANLA, 2014); dentro de los lineamientos de este documento, se deberá presentar la información relacionada con la evaluación de impactos ambientales en dos escenarios: sin proyecto (antes de realizar la

[5] Por el cual se reglamenta el Título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre licencias ambientales.
[6] De acuerdo al art. 1 del Dec. 2041 de 2014: "Un proyecto, obra o actividad incluye la planeación, emplazamiento, instalación, construcción, montaje, operación, mantenimiento, desmantelamiento, abandono y/o terminación de todas las acciones, usos del espacio, actividades e infraestructura relacionados y asociados con su desarrollo".

intervención en el área de estudio) y con proyecto (durante la intervención en el área de estudio).

Así mismo mediante este Decreto, para las licencias ambientales se requiere la participación de las comunidades para la toma de decisiones dentro de la ejecución que de un proyecto que pueda generar afectación o deterioro grave ya sea al ambiente o a los recursos naturales renovables. Para lograr esto, las empresas operadoras deberán informar de manera oportuna a las comunidades el alcance y duración del proyecto, como la identificación de impactos ambientales ocasionados durante la ejecución del proyecto, y las medidas de manejo propuestas; lo anterior, debe ser incluido en el estudio de impacto ambiental. Hay que destacar que las licencias ambientales llevarán incluidos todos los permisos y/o concesiones para uso, aprovechamiento y/o afectación de los recursos naturales que sean necesarios para el desarrollo del proyecto.

Uso del agua en la actividad petrolera

El uso del recurso hídrico en la actividad petrolera es de vital importancia, dado que en cada una de las etapas de obras civiles (construcción vías de acceso y localizaciones), operación (perforación, producción, transporte, pruebas de producción y refinación), abandono y restauración final (culminación del proyecto), y en actividades específicas se requiere el uso, aprovechamiento o afectación de recursos naturales. Para obtener el permiso del aprovechamiento del recurso hídrico, la ANLA es la entidad ambiental competente para poder otorgar o no una concesión de aguas, para el desarrollo de un proyecto determinado, por ejemplo,

en un área de perforación exploratoria[7]. En un Área de Perforación Exploratoria dentro de sus actividades, el recurso natural de mayor demanda corresponde al hídrico. La captación del recurso podría realizarse de tipo superficial o subterránea.

Los usos del agua en la actividad petrolera se dividen en dos categorías: en el primero, el uso doméstico para el consumo del recurso por parte de trabajadores, para la preparación de alimentos (casino) así como también el uso de baños portátiles y duchas. Por otro lado, el segundo es el industrial, que contiene actividades de limpieza, materiales, equipos y/o utensilios empleados en actividades puntuales para obras civiles, perforación, inyección de agua, prueba hidrostática, preparación de lodos, entre otros. Dependiendo del tipo de uso, se calcula el caudal requerido, teniendo en cuenta la población, el comportamiento del clima y demás especificaciones, de acuerdo con el Reglamento Técnico de Agua Potable y Saneamiento Básico. También, se debe hacer un análisis hidrológico detallado con el fin de analizar los caudales[8] característicos de una fuente hídrica determinada en época de invierno y en verano siempre y cuando pueda ser objeto de aprovechamiento hídrico.

El IDEAM en su Estudio Nacional del Agua, presenta la demanda hídrica para el sector de hidrocarburos teniendo en cuenta sus diferentes fases y las categorías descritas anteriormente, en las que se evidencia que el consumo de agua industrial en las fases de sísmica, perforación exploratoria y producción es superior que el

[7] Es un polígono delimitado por el usuario, para adelantar de acuerdo con la zonificación ambiental del mismo, las diferentes actividades relacionadas con la perforación de pozos. Términos de referencia para Estudios de Impacto Ambiental, proyectos de perforación exploratoria de hidrocarburos. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Dirección de Licencias, Permisos y Trámites Ambientales. 2010. Recuperado el 28-08-2015 de: http://www.anla.gov.co/documentos/normativa/res_1543_060810_tdr_exploracion_hidrocarburos.pdf

[8] Cantidad de un líquido o un gas que fluye en un determinado lugar por unidad de tiempo. Diccionario de la Real Academia Española. Recuperado de: http://lema.rae.es/drae/?val=caudal

consumo humano teniendo en cuenta todas las actividades que intervienen durante el proceso productivo del petróleo y demás actividades transversales:

Tabla 2 Demanda hídrica en las fases del sector hidrocarburos en Colombia

Fase	Descripción	Consumo
Sísmica	Tiene como objetivo la adquisición de información sobre ubicación y composición de las formaciones geológicas del subsuelo en un sector determinado para complementar otras investigaciones físicas realizadas en la región y definir la ubicación de yacimientos económicamente viables.	*Agua industrial: 9,19 m^3/km de actividad sísmica
		Agua doméstica: 7,65 m^3/km de actividad sísmica
Perforación exploratoria	Consiste en localizar e identificar mediante por medio de investigaciones exhaustivas de carácter geológico, geofísico y geoquímico, la existencia de las formaciones subterráneas que puedan contener hidrocarburos. En caso de dar un resultado positivo según lo obtenido en la sísmica, se procede a la perforación de pozos. Existe perforación onshore (o terrestre) y offshore (o costa afuera). La exploración se realiza en áreas de perforación exploratoria adjudicadas a las operadoras por la ANH.	*Agua industrial: 190,2 m^3/1.000 pies de perforación
		Agua doméstica: 31,51 m^3/1.000 pies perforación
Producción	Posterior a la exploración, en la producción se extraen los hidrocarburos desde la capa de roca hasta la superficie. Para extraer los hidrocarburos se utilizan dos mecanismos: a través de válvulas llamadas Árbol de Navidad (cuando los hidrocarburos fluyen a la superficie por sí solos) y mediante una máquina llamada Balancín (está conectado por	*Uso industrial: 0.106 m^3/ por barril producido
		Uso doméstico: 0.004 m^3/ barril producido

	una bomba mecánica la cual succiona el hidrocarburo hasta la superficie.	
Transporte	El hidrocarburo que fue explorado, es transportado primero mediante oleoductos y luego a estaciones de bombeo y almacenamiento hacia los centros de refinación, o en caso que se realice exportación del mismo, va directo a los puertos marítimos o de embarque.	Uso industrial: 0.106 m^3/ por barril transportado
Refinación	La refinación consiste en transformar el petróleo tratado anteriormente sometiéndolo hasta los 400 grados centígrados, con el fin de obtener alrededor de 2.000 productos derivados, entre los cuales se encuentran combustibles (gasolina, diésel, gas y otros), petroquímicos (benceno, polietileno, plásticos, disolventes alifáticos), entre otros. En Colombia, las principales refinerías son la de Barrancabermeja (Santander), Reficar (Bolívar), Orito (Putumayo), Cartagena (Bolívar) y Apiay (Meta) operadas por Ecopetrol S.A. y Floreña operada por Equión.	Uso industrial: 0.2477 m^3/ por barril refinado

Fuente: Elaboración propia, mediante información del Estudio Nacional del Agua. IDEAM (2014)

Para mencionar la importancia de la normatividad ambiental vigente en Colombia, en la Tabla 3 se presentan las normas que aplican para el sector de hidrocarburos en relación a la planificación del uso y aprovechamiento del recurso hídrico:

Tabla 3 Normatividad ambiental vigente para el sector Hidrocarburos

Normatividad	Contextualización con el recurso hídrico
Constitución Política de Colombia (1991) Capítulo 3. De los derechos colectivos y del ambiente	Art. 79: Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo. Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines. Art. 80: El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución. Además, deberá prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental, imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados.
Decreto 1076 de 2015 Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible	Incluye los siguientes actos administrativos: Decreto 2911 de 1974: Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente Ley 99 de 1993: se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones Decreto 321 de 1999: Plan Nacional de Contingencia (PNC) contra derrames de Hidrocarburos, Derivados y Sustancias Nocivas Decreto 2041 de 2014: licencias ambientales (Capítulo 3) CAPITULO 4. Audiencias públicas Libro 2. Capítulo 3. Ordenamiento del recurso hídrico y vertimientos

	Titulo 3. Aguas no marítimas. Capítulo 1. Instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos Capítulo 2. Uso y aprovechamiento del agua Capítulo 3. Ordenamiento del recurso hídrico y vertimientos

Fuente: Elaboración propia, considerando la normatividad ambiental vigente a 2016.

Los actores involucrados que se identifican en la cadena de valor del sector hidrocarburos se presentan a continuación:

Método

Con el fin de presentar la gobernanza del agua asociada a la actividad petrolera, el trabajo se realizó en tres etapas:

La **primera etapa** consistió en la conceptualización de la gobernanza en Colombia y su influencia en el sector extractivo, la importancia de los mecanismos de participación comunitaria, así como una revisión de la cadena productiva de los hidrocarburos y los diferentes usos que se le da al recurso hídrico, determinando los procesos a favor y en contra presenten en diferentes regiones del país.

En la **segunda etapa**, se identificaron los procesos de gobernanza del agua relacionados con proyectos de hidrocarburos por medio de una revisión documental con información secundaria disponible acerca de los proyectos ejecutados en distintas regiones del país en sus diferentes fases. Dicha revisión documental se realizó desde el año 2005 hasta el 2015 (últimos 10 años del auge del sector de

hidrocarburos) con el objetivo de identificar los casos exitosos (a favor) y no exitosos (en contra) relacionados con procesos de gobernanza del agua, así como también el reconocimiento de los mecanismos de participación ciudadana.

En la **tercera etapa**, se construyen matrices de análisis de los procesos mediante tres aspectos: 1. ubicación geográfica, mencionando el departamento, municipio y/o vereda del caso reportado; 2. descripción del proyecto, se menciona de manera breve; 3. Factores involucrados dentro del proceso de gobernanza mediante el método PESTEL incluyendo en análisis de factores externos para los contextos económicos, sociales, ambientales y políticos que pueden influir en cada caso.

En cuanto a la búsqueda de información, se realizó una investigación de la temática de la gobernanza del agua y su relación con los proyectos que se han ejecutado en el sector de hidrocarburos en Colombia. Para esto, se tuvo en cuenta la normatividad vigente, la conceptualización de la gobernanza del agua en Colombia, los mecanismos de participación, los fundamentos del sector de hidrocarburos obtenidas de instituciones nacionales y noticias escritas, principalmente.

Los casos fueron seleccionados bajo los criterios de trascendencia nacional, comunidad afectada, aspectos ambientales y actores involucrados.

Las variables que se analizaron están enmarcadas dentro de los intereses de la comunidad en el que se evidencian aspectos tales como la vulneración de derechos, tanto fundamentales como colectivos, así como la conservación y preservación de los recursos naturales, entre otros.

Se consideró la información a nivel nacional de la gobernanza del agua y su relación con el sector hidrocarburos, teniendo en cuenta que en los últimos años los casos más representativos han sido la ejecución de pozos exploratorios que no cumplen con las medidas ambientales adecuadas y los derrames de hidrocarburos en fuentes hídricas (José María Silos Rodríguez, 2008), afectando de manera directa la integridad de la población que vive en sitios aledaños a las diferentes cuencas hidrográficas, el ecosistema y así mismo los interés económicos del país.

La información disponible se considera limitada, ya que no fue posible acceder a resultados de investigación adelantados por entidades ambientales competentes o que tengan más abordada la problemática de los derrames que se han presentado en fuentes hídricas, con monitoreos fisicoquímicos, o que contengan el análisis con distintas regiones y/o que permitan establecer el alcance de los impactos ambientales.

Resultados

Según la metodología descrita, a continuación, se presentan los casos de estudio analizados de acuerdo a los procesos a favor y en contra, mediante el análisis PESTEL (incluye factores externos políticos, económicos, ambientales y sociales), identificados los aspectos involucrados en el proceso de gobernanza, según lo establecido por el PNUD y los resultados obtenidos para cada caso:

Tabla 4 Procesos a favor de la gobernanza del agua

Ubicación geográfica	Descripción del Proyecto	Factores involucrados (Método PESTEL)
Departamento: Norte de Santander, vereda Troya **Proyecto: Pozo Magallanes 1** Año: 2014	Ecopetrol S.A. ingresa a la zona para la ejecución de obras civiles del pozo Magallanes 1 ubicado en la vereda, a tan solo 270 metros del Resguardo Indígena U´wa. No obstante, se suspendieron actividades en mayo de 2014 debido a acuerdos realizados con el Gobierno Nacional por solicitud de la comunidad indígena U´wa, al no llegar a un acuerdo entre las partes interesadas, Ecopetrol S.A. decidió retirar los equipos de la zona y suspender temporalmente las actividades del proyecto, y posteriormente, desmovilizar el pozo de la zona.	• Factores ambientales: *Contaminación a fuentes de agua superficial por el desarrollo del proyecto exploratorio *Uso de agua *Preservación del medio ambiente • Factores políticos: *Conservación de derechos humanos y costumbres indígenas *Prima el bien común sobre el particular por acción de la comunidad indígena al Gobierno • Factores sociales: *Preservación de derechos humanos y costumbres indígenas *Respeto a la vida *Conservación del territorio indígena • Factores económicos: *Desarrollo económico del país *Incumplimiento de los principios de desarrollo sostenible, en cuanto a los procesos de desarrollo económico

Ubicación geográfica	Descripción del Proyecto	Factores involucrados (Método PESTEL)
		(Declaración Río de Janeiro, 1992)
Departamento: Casanare (municipios de Tauramena, Recetor, Monterrey y Chámeza) **Proyecto: Sísmica Odisea 3D** Año: 2010	Se realizó una consulta popular en las veredas del área de influencia del proyecto, previo a la ejecución del proyecto. El resultado obtenido fue: 151 personas respondieron de manera afirmativa, y de manera negativa 4.426, rechazando la viabilidad del proyecto	• Factores ambientales: *Afectación directa a manantiales, en el cual se abastecen más de tres municipios del área de influencia *Sensibilidad ambiental por ubicarse en el pie de monte llanero (ecosistema estratégico). Se considera dentro de los principios generales ambientales (Ley 99/1993, art. 1, num. 4) *Conservación del recurso hídrico
		• Factores socio-políticos: *Conservación de derechos humanos *Cumplimiento de derechos fundamentales y colectivos *Prima el bien común sobre el particular *Uso equitativo a la hora de tomar decisiones en materia ambiental

Ubicación geográfica	Descripción del Proyecto	Factores involucrados (Método PESTEL)
		• Factores económicos: *Desarrollo económico del país *Incumplimiento de los principios de desarrollo sostenible, en cuanto a los procesos de desarrollo económico (Declaración Río de Janeiro, 1992)
Departamento: Meta, municipio de Puerto Gaitán **Proyecto: Campo Quifa** Año: 2016	La Corte Constitucional ordena la suspensión de las operaciones de Pacific Rubiales Energy en Campo Quifa, uno de los principales campos petroleros del país, por no haber dado a conocer el proyecto a una comunidad étnica (Resguardo Vendedor Pirirí) omitiendo el proceso de consulta previa. El campo es atravesado por el caño Cajúa, una fuente hídrica de importancia central para la comunidad.	• Factores sociales, económicos y políticos: *Amenaza en los derechos al agua, salud y vida *Afectación de creencias étnicas Preservación de existencia de grupos étnicos
		• Factores ambientales: *Contaminación a fuentes de agua superficial por el desarrollo del proyecto exploratorio *Uso del agua *Defensa del medio ambiente
		• Factores socio-económico: *Suspensión del proyecto por orden de

Ubicación geográfica	Descripción del Proyecto	Factores involucrados (Método PESTEL)
		la Corte Constitucional *Aumento desempleo *Generación de conflictos
Departamento: Putumayo **Proyecto: Campo Cohembí** Año: 2016	Igual que el caso anterior, la Corte Constitucional ordenó a Ecopetrol S.A. y Petrominerales suspender las actividades extractivas en dos pozos ubicados en la vereda El Naranjito de Orito. Se deberá realizar el proceso de consulta previa con la comunidad indígena awá del Alto Temblón.	• Factores sociales, económicos y políticos: *Modificación de la diversidad de la cultura indígena por la actividad petrolera *Vulneración de derechos de la comunidad *Preservación de existencia de grupos étnicos *Incumplimiento marco normativo, afectando interés de la comunidad. *Falta de conocimiento por las empresas operadores de la existencia de comunidades indígenas.
		• Factores ambientales: *Contaminación de las aguas del río Orito *Defensa del medio ambiente *Incumplimiento de las medidas de manejo ambiental

Ubicación geográfica	Descripción del Proyecto	Factores involucrados (Método PESTEL)
		establecidas por la operadora.
		• Dimensión socio-económica: *Suspensión del proyecto por orden de la Corte Constitucional *Aumento desempleo *Generación de conflictos

Fuente: Adaptada por la Autora, 2016

Tabla 5 *Procesos en contra de gobernanza del agua*

Ubicación	Descripción del Proyecto	Factores involucrados (Método PESTEL)
Departamento: Meta, municipio de Acacías **Proyecto: Pozo exploratorio Lorito 1**	Construcción de un pozo exploratorio por Ecopetrol S.A. en cercanías de la bocatoma al acueducto de la vereda Humadea del municipio de Guamal que suple a varias veredas, alrededor de 350 personas. El acueducto se	• Factores ambientales: *Vulneración de derechos colectivos y del ambiente (art. 79 y 80 de la Constitución Política de Colombia)

Ubicación	Descripción del Proyecto	Factores involucrados (Método PESTEL)
Año: 2013	encuentra a 2.5 kilómetros de la plataforma exploratoria y por otra parte, el funcionamiento del acueducto. A pesar de lo anterior, la autoridad ambiental manifiesta que el pozo cumple con los criterios ambientales establecidos según la zonificación de manejo ambiental.	*Desequilibro en el desarrollo sostenible *Contaminación a fuentes de agua superficial por el desarrollo del proyecto
		• Factores sociales: *Interacción social *Oportunidades laborales *Amenaza en los derechos al agua, salud y vida *Omisión del proyecto a la comunidad por parte de Ecopetrol S.A.
		• Factores políticos: *Afectación del servicio de agua potable *A pesar de la problemática, el proyecto se llevó a cabo
		• Factores económicos: *Aumento ingresos económicos *Afectación del espacio de recreación
Derrames ambientales	En los últimos 25 años, se han presentado innumerables	• Dimensión social, política y ambiental:

Ubicación	Descripción del Proyecto	Factores involucrados (Método PESTEL)
intencionales en zonas de producción y/o transporte de hidrocarburos Atentados terroristas en el oleoducto Caño Limón – Coveñas, Putumayo	derrames provocados a la infraestructura petrolera en diferentes tramos del Oleoducto, afectando de manera directa al recurso como a las comunidades que habitan en la zona. Dichos atentados han sido realizados de manera intencional por grupos armados. Dentro de sus consecuencias, se encuentra la contaminación a quebradas, ríos, predios, ecosistemas superficiales tales como humedales y subterráneos como nacederos y pozos profundos o de agua subterránea, como también afectación en el abastecimiento de agua potable por presentarse el derrame en cercanías de acueductos veredales, como también afecta a la economía del país.	*Vulneración de derechos colectivos y del ambiente (art. 79 y 80 de la Constitución Política de Colombia) *Amenaza en los derechos al agua, salud y vida *Desequilibro en el desarrollo sostenible *Pérdida de biodiversidad y ecosistemas • Factores sociales: *Interacción social *Disminución de oportunidades laborales *Deterioro en la calidad de vida *Inseguridad
		• Factores económicos *Reducción de ingresos económicos *Afectación del espacio de recreación, actividades comerciales y económicas

Ubicación	Descripción del Proyecto	Factores involucrados (Método PESTEL)
Derrames ambientales intencionales en zonas de producción y/o transporte de hidrocarburos Derrame ambiental en la bahía del municipio de Tumaco	En junio de 2015, ocurrió un atentado provocado por las FARC en la bahía de Tumaco, en el que se derramaron ade manera intencional 410.000 galones de crudo. La mancha finalizó en el Terminal Marítimo de Tumaco. Según el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, esta catástrofe se considera como uno de los más graves que ha sufrido el país.	• Factores sociales, económicos y políticos: *Amenaza en los derechos al agua, salud y vida *Conflictos por no acceso al agua potable y alimentos • Factores ambientales: *Afectación del ecosistema marino (flora y fauna) • Factores socio-económicos: *Modificación de la economía (actividad de pesca)
Área de Interés de Perforación Exploratoria Serranía Año: 2013	Realización de una audiencia pública en contra de la empresa Hupecol, la cual tiene adjudicada este Bloque para exploración. La mitad del área a intervenir se encuentra en jurisdicción de Parques Nacionales Naturales (PNN).	• Factores ambientales: *Afectación del ecosistema marino (flora y fauna) *Vulneración de derechos colectivos y del ambiente *Desequilibro en el desarrollo sostenible *Afectación a servicios ecosistémicos y recurso hídrico por estar dentro de un PNN

Ubicación	Descripción del Proyecto	Factores involucrados (Método PESTEL)
		*No hay protección de la biodiversidad, siendo considerado como patrimonio nacional y de interés de la humanidad
		• Factores políticos y económicos: *Intereses del Gobierno prima para realizar este proyecto, al encontrarse en un Parque Nacional Natural
		• Factores sociales: *Solicitud por parte de la comunidad de audiencia pública, dado el inconformismo del proyecto de exploración *Vulneración de derechos
Departamento: César (municipio San Martín **Proyecto: Fracking** Año: 2016	El fraccionamiento hidráulico es una forma de explotación de hidrocarburos, donde se mezcla agua, arena y productos químicos. En países desarrollados tales como Francia, España, algunos estados de EE.UU y Alemania	• Factores ambientales: *Contaminación del suelo y agua *Impacto a la salud humana *Alteración de capas del suelo

Ubicación	Descripción del Proyecto	Factores involucrados (Método PESTEL)
	tienen prohibido esta actividad para la preservación del medio ambiente. Hasta el momento, no se ha expedido un acto administrativo que apruebe esta práctica en el país. No obstante, en marzo se reunieron cerca de 3.000 personas para protestar en contra de la explotación de petróleo mediante Fracking con previa aprobación de la ANH. La comunidad en general está en contra de esta práctica, sabiendo que esta comunidad ha sufrido de cerca la violencia por grupos armados y ha tenido actividad petrolera, lo cual ha generado graves efectos ambientales y sociales. Los habitantes están recogiendo firmas para exigir a la Alcaldía de este municipio, convocar a consulta popular este proyecto	• Factores económicos: *Aumento de exploración en el país con esta práctica *Aumento en el desarrollo económico del país • Factores sociales: *Generación de conflictos por el desarrollo de esta práctica *Vulneración de derechos • Factores políticos: *No hay ninguna normativa aprobada por el Ministerio de Minas o de Ambiente que apruebe esta práctica. *Falta de comunicación por parte del Gobierno, Ministerio de Minas y Ambiente, a los ciudadanos sobre su opinión con respecto a esta práctica

Fuente: Adaptada por la Autora, 2016

Discusión

En Colombia no existe un cuerpo normativo único que regule de manera comprehensiva e integral el recurso hídrico. Las normas sobre la materia, se encuentran dispersas a lo largo de los distintos textos legales y reglamentarios, que abordan la protección, administración, manejo y aprovechamiento del recurso desde ópticas diversas e inspirados en distintos intereses (Ponce de León, 2006). Adicionalmente, por más que la normatividad esté reglamentada mediante decreto o resolución, no es de tipo exigente al no establecer responsabilidades, funciones y acciones de mejora para actuar frente al ingreso de una operadora de hidrocarburos a un área de conservación ambiental y/o reguardo indígena, como también lo es cuando ocurre un derrame intencional de hidrocarburo que afecte un cuerpo de agua. Carece también de un seguimiento continuo por parte de la autoridad ambiental, quien debe estar pendiente del cumplimiento por parte de las empresas operadoras según el área donde se realicen actividades.

Con los casos presentados, se concluye que, asociados a los hidrocarburos se han presentado varios conflictos socioambientales que afectan la gobernanza del agua en las regiones, generando daños ambientales, vulneración de derechos y conflictos permanentes en las poblaciones locales, fomentando de esta manera los conflictos de tipo ambiental por intereses particulares. De acuerdo con Avellaneda (2004) en el ensayo "*Petróleo, ambiente y conflicto"* llega a la conclusión que los conflictos relacionados con petróleo y ambiente están fundamentados en un escenario de inequidad y segregación, lo cual ha generado afectación a territorios y culturas indígenas, como también la destrucción de recursos naturales indispensables tales como la biodiversidad, el agua, el suelo, entre otros, provocando de esta manera que los conflictos impacten gran parte del país.

El Estado colombiano así lo ha permitido o favorecido, pero es esquivo o indiferente para asumir las consecuencias (Avellaneda, 2004). El Estado colombiano tiene la obligación de regular el desarrollo de este tipo industrial, como el del sector de hidrocarburos, para poder sobrellevar y afrontar los conflictos por el uso y la demanda del agua y sus impactos, en conformidad con la biodiversidad y los ecosistemas estratégicos, permitiendo de esta manera un ordenamiento sostenible del territorio, como también, los lineamientos establecidos en la PGIRH (El Espectador, 2014). De la misma manera, Avellaneda menciona que en el año 1985 la crisis ambiental emergió en el Campo Casabe, entre los cuales, se mencionan: contaminación de aguas superficiales por derrames de crudo, problemas de salud en la población por consumo de agua de los caños afectados por la contaminación y envenenamiento de animales, quema de cultivos y pastos con crudos, taponamiento de caños y perjuicio sobre los pastos y cultivos por las exploraciones para las labores de instalación de pozos de inyección de agua, vibraciones que producen deslizamientos de tierra, entre otros aspectos.

Es así, como la Contraloría General de la República de Colombia, en el documento titulado *Minería en Colombia. Derechos, políticas públicas y gobernanza (2013),* refiriéndose a las “Implicaciones ambientales y sociales del modelo extractivista en Colombia” llega a la acotación sobre los conflictos, siendo el modelo minero un punto potenciador de conflictos, entre ellos está la problemática de la propiedad del suelo vs. la concesión del subsuelo. Para minimizar los conflictos, se requiere el diseño de políticas que vayan más allá de los sectores minero-energéticos, incluyendo el subsuelo, agua, y demás aspectos ambientales a ser considerados.

La mayoría de los casos van en contra de los procesos sociales relacionados con gobernanza del agua, en donde prevale el interés general sobre el particular restándole importancia la afectación sobre los recursos naturales renovables (en este caso, el recurso hídrico) por la ejecución de proyectos que benefician al país económica y políticamente, sin tener en cuenta el deber del Estado según la Constitución Política de Colombia (1991) con el artículo 79 “Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines” y con el artículo 80 “El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución. Además, deberá prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental, imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados”. El Estado colombiano así lo ha permitido o favorecido, pero es esquivo o indiferente para asumir las consecuencias (Foro Nacional Ambiental, 2004).

Los Estados deben preservar los ecosistemas que se encuentran dentro de sus territorios y de asegurar que las actividades que se llevan a cabo no afecten los ecosistemas ubicados en otros departamentos. (Iza, Grethel Aguilar y Alejandro, 2009). A medida que fue avanzando la exploración en el país, en especial en los Llanos Orientales, las comunidades de los departamentos del Meta y Casanare empezaron a presentar diferencias en la disponibilidad del recurso hídrico superficial, presentando caso de contaminación sobre la fuente generando que no fuera apta para consumo humano, debido a exploraciones sísmicas y perforación de pozos sin el debido seguimiento, y contaminación por vertimientos directos a cuerpos de agua o por derrames intencionales. Según la ANH, establece que el 14% de los inversionistas del sector distinguen que los conflictos sociales van

creciendo y que están bloqueando el desarrollo de actividades de Exploración y Producción en el país (Periódico El Tiempo, 2014).

Conclusiones

Si bien, muchos de los casos presentados en esta investigación se desarrollan en las diferentes etapas del sector de hidrocarburos, es de resaltar que todas estas actividades están enmarcadas dentro de un marco normativo de licencias ambientales, que establece los lineamientos para el desarrollo de las actividades, de tal manera que los impactos ambientales generados sean preventivos, de mitigación, de corrección y de compensación; por esta razón, las actividades del normal desarrollo aunque pueden generar conflictos tienen sus mecanismos de control ambiental que dependen de la gestión de las empresas y del seguimiento del Estado.

De esta manera, los resultados permitieron concluir que una de las deficiencias de los sistemas de gobernabilidad del agua en el país, es la insuficiencia e ineficacia de los marcos normativos en Colombia y otros países de América Latina, dado que la CEPAL afirma que la situación se agrava por la debilidad de las autoridades nacionales de aguas y de las entidades encargadas de las cuencas, así como la deficiente participación del gobierno, instituciones, usuarios y sectores productivos.

No solo para los casos presentados en este artículo, sino para los derrames ambientales provocados por grupos armados, el Gobierno colombiano debe promover un equilibrio entre el crecimiento económico y la preservación de ecosistemas con el fin de evitar impactos ambientales a gran escala en el recurso

hídrico, lo cual genera afectación directa a la biodiversidad (fauna y flora) afectando de manera directa sus servicios ecosistémicos, como también la calidad de vida de la sociedad. Lo anterior aplica para los demás actores involucrados del sector extractivo: construcción, energético, minería, entre otros.

Para las empresas del sector de Hidrocarburos se recomienda ejecutar buenas prácticas entorno a la gobernanza del agua en pro de la comunidad y de la normatividad vigente, como por ejemplo, conservación del recurso hídrico, gestión del riesgo, responsabilidad social empresarial, participación comunitaria, ordenación de cuencas, entre otros. No solamente el ambiente está en peligro de contaminación, de degradación y de alteración parcial o total, sino las costumbres, la salud y la integridad física de la población civil que ha sido cruelmente afectada por tantos atentados terroristas a la infraestructura petrolera.

Bibliografía

ANLA. (2014). *Autoridad Naciona de Licencias Ambientales*. Obtenido de http://www.anla.gov.co/normativa/historial-normativa-ambiental

Cárdenas Henao, J. H. (s.f.). *Acueductos comunitarios alternativos para el manejo sostenible del agua y la sequía.* Recuperado el 07 de Septiembre de 2015, de Adaptaciones locales frente al cambio climático: http://semillas.org.co/es/revista/acueductos-comunitarios-alternativos-para-el-manejo-sostenible-del-agua-y-la-sequ

Dinero, R. (05 de 02 de 2015). *Revista Dinero*. Obtenido de http://www.dinero.com/edicion-impresa/caratula/articulo/los-problemas-industria-petrolera-colombiana/205439

DNP. (2015). *Plan Nacional de Desarrollo: Todos por un nuevo país. Tomo II.* Bogotá, D.C.: Departamento Nacional de Planeación. Obtenido de https://www.dnp.gov.co/CNP/Paginas/Documentos.aspx

GWP. (2012). *Proceso regional de las Américas. VI Foro Mundial del Agua*. Obtenido de Hacia una buena gobernanza para la gestión integrada de los recursos hídricos: http://www.gwp.org/Global/GWP-CAm_Files/Gobernanza%20para%20la%20GIRH.pdf

IDEA. (2013). Documento Técnico. Informe final acompañamiento en la fase de diseño del Observatorio Colombiano de Gobernanza del Agua (OCGA). En M. d.-U. Nacional. Bogotá.

IDEAM. (2014). En E. N. Agua. Bogotá, D.C.

Iza, Grethel Aguilar y Alejandro. (2009). *Gobernanza de aguas compartidas: aspectos jurídicos e institucionales.* 2009.

MADS. (s.f). *Gestión integral del recurso hídrico*. Obtenido de https://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article?id=1957:gobernanza-del-agua

MAVDT. (2010). *Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico.* Bogotá, D.C.

Periódico El Tiempo. (11 de 06 de 2014). Obtenido de http://www.eltiempo.com/archivo/documento-2013/DR-869662

Periódico El Tiempo. (07 de 04 de 2015). Obtenido de http://www.eltiempo.com/economia/sectores/produccion-petrolera-en-colombia/15532124

PNUD. (2006). *Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.* Obtenido de Informe: Los retos de la Gobernabilidad. : http://www.gwp.org/Global/ToolBox/References/Cross%20Cutting%20Issues%20-%20Spanish/Governance/2%C2%BAInforme_retos_gobernabilidad.pdf

PNUD. (2006). *Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.* Obtenido de Informe: Los retos de la Gobernabilidad. Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola: http://www.gwp.org/Global/ToolBox/References/Cross%20Cutting%20Issues%20-%20Spanish/Governance/2%C2%BAInforme_retos_gobernabilidad.pdf

PNUD. (2012). *Los retos de la gobernabilidad del agua.* Obtenido de http://www.gwp.org/Global/GWP-CAm_Files/Gobernanza%20para%20la%20GIRH.pdf

Ponce de León Chauz, Eugenia. (2006). *Gobernanza del agua en América del sur: dimensión ambiental.* Gland, Suiza y Cambridge, Reino Unido: Alejandro O. Iza y Marta B. Rovere.

WGC. (2013). *Informe II. Elementos para la formulación de una estrategia nacional para la gobernanza del agua en Colombia.*

65° CONGRESO INTERNACIONAL
Agua, Saneamiento, Ambiente y Energías Renovables
Bogotá - Colombia
Centro de Convenciones Ágora
Julio 13, 14 y 15 de 2022

Análisis numérico mediante iber del funcionamiento hidráulico de aforadores de garganta larga modificados, para cuencas pequeñas con azolves

J. G. Brigido Morales*, M. Carrillo García[1], J. V. Prado Hernández[1], J. Flores Velázquez[2]
[1]Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Universidad Autónoma Chapingo.
[2]Posgrado en Hidrociencias, Colegio de Postgraduados, campus Montecillo.
**Autor corresponsal:* Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Universidad Autónoma Chapingo, Carr. México-Texcoco, km 38.5. Chapingo, Texcoco, Estado de México. 56230. México. Email: jgabriel.brigido@gmail.com

Abstract
Reliable quantification of water volumes in small watersheds is crucial for their management. This work presents the analysis of three flumes designed with the WinFlume® v.2.0 program, for maximum flows in each flume of 250 $l \cdot s^{-1}$, 500 $l \cdot s^{-1}$ and 1000 $l \cdot s^{-1}$, adding a chute with a 10% slope; to represent sedimentation a variant of each structure was generated, increasing the bottom elevation of its inlet sections to match the elevation of control section. Using Iber® v.2.5.2, the hydraulic simulation of each flume was carried out in a non-permanent regime, using synthetic hydrographs for peak times of 30, 50 and 80 minutes, with flows greater than the design flow rate; 22 to 24 flow depth measurements were taken, distributed during the simulation time and coinciding with flow rates for the validity range of operation of the flumes. Variations close to 2% were determined for the flow rates obtained in the simulations with respect to the simulated flow rate, while the variations of the flow in the chute between the original and modified structures were less than 1%. The flow-depth relationships (Q-h) found in the chute were adjusted to a model of the form $Q=k \cdot h^n$ obtaining an R^2 of 0.99995 and concluding that this type of flume can be useful for measurement in small watersheds, in the presence of storms with sediment entrainment that block the intakes upstream of the gauges.

KeyWords: *design, flow measurement structure, hydraulic simulation, sediment flow.*

Propuesta de aforadores para cuencas pequeñas y análisis numérico de su funcionamiento hidráulico mediante Iber

Resumen

La cuantificación de los volúmenes de agua de manera confiable en pequeñas cuencas es vital para su aprovechamiento. Este trabajo presenta el análisis de la propuesta de tres aforadores diseñados con el programa WinFlume® v.2.0, para caudales máximos en cada aforador de 250 $l \cdot s^{-1}$, 500 $l \cdot s^{-1}$ y 1000 $l \cdot s^{-1}$, a los cuales se añadió una rápida con pendiente del 10%; para representar los azolves, se generó una variante de cada estructura aumentando la cota de fondo de sus secciones de entrada hasta igualar la cota de las secciones de control. Usando Iber® v.2.5.2, se realizó la simulación hidráulica de cada aforador, en régimen no permanente, utilizando hidrogramas sintéticos para tiempos pico de 30, 50 y 80 minutos, con flujos mayores al caudal de diseño; se tomaron de 22 a 24 mediciones de profundidad de flujo, distribuidas en el tiempo de simulación y coincidentes con caudales para el rango de validez de operación de los aforadores. Se determinaron variaciones cercanas al 2% para los caudales obtenidos en las simulaciones con respecto al caudal simulado, mientras que las variaciones del flujo en la rápida entre las estructuras originales y modificadas fueron menores del 1%. Las relaciones caudal-profundidad (Q-h) encontradas en la rápida se ajustaron a un modelo de la forma $Q=k \cdot h^n$, obteniendo un R^2 de 0.99995, se concluye que estos aforadores pueden ser útiles para aforar cuencas pequeñas, ante la presencia de tormentas con arrastre de sedimentos que bloqueen las tomas aguas arriba de los aforadores.

Palabras clave: diseño, estructura de aforo, simulación hidráulica, flujo con sedimentos.

Introducción

La gestión de los recursos hídricos constituye uno de los problemas ambientales que requiere atención de manera urgente, especialmente debido a la competencia por los recursos hídricos entre la agricultura, agua potable, industria y el medio ambiente. Dado que se estima que entre el 80 y 90% del agua utilizada a nivel mundial está destinada a la agricultura, y que la eficiencia de aprovechamiento de esta actividad es de aproximadamente el 50%, se han abordado estrategias enfocadas sobre todo a la mejora de sistemas de distribución, optimización de técnicas de riego, uso de variedades con menores requerimientos hídricos e incluso el reúso de aguas residuales tratadas (Bitelli, 2010).

Cada actividad encaminada a lograr un uso más eficiente del agua es crucial para liberar agua que pueda ser destinada para otros usos; sin embargo, una actividad que debería considerarse de suma importancia es lograr una correcta medición de

los volúmenes de agua que fluyen aún en los cauces pequeños, pues como señalan Gowing *et al.* (2006), intervenciones mal concebidas o mal implementadas han provocado altos costos sociales y ambientales, siendo ejemplo de ello una asignación no equitativa del agua, al destinar a la agricultura un mayor volumen del que realmente se puede disponer, o impactos no deseados en los recursos naturales al extraer más agua de la que necesita para mantener la vida. En este sentido y de acuerdo con Sánchez *et al.* (2003) se debe considerar a la microcuenca o cuencas pequeñas (unidades con una superficie cercana a los 50 km^2) para poder intervenir y hacer un ordenamiento, pues esta es la mejor manera para poder visualizar y manejar la producción del agua.

Cuando hablamos de la medición del agua, es inevitable pensar que existe una gran cantidad de investigación sobre estructuras de aforo; sin embargo, una revisión más profunda nos permite detectar que la investigación se ha enfocado en su mayoría a la medición de agua limpia, siendo el principal problema de la mayoría de las estructuras, la sedimentación existente cuando estas se instalan en cauces naturales. Si nos concentramos en revisar investigaciones sobre aforo de flujo con sedimentos encontramos que ésta es muy reducida, entre las últimas investigaciones que podemos citar tenemos a Smith *et al.* (1981), Göğüş y Altinbilek (1994), Carrillo (1999) así como Castro-Orgaz y Mateos (2014).

Este trabajo aborda la propuesta de aforadores para cuencas pequeñas, utilizando los criterios de diseño de aforadores de garganta larga, pues de acuerdo con sus autores posee un error cercano al 2% sustentado analítica y experimentalmente (Clemmens *et al.,* 2001). Sin embargo, dado que el diseño original también sufre de problemas de obstrucción del conducto del pozo de mediciones, Replogle (com. pers.) planteó como una posible solución, la adición de una rápida y colocación de un segundo pozo de mediciones en el aforador. Dado que, previamente se han hecho algunos análisis numéricos con estructuras pequeñas de 25 y 50 $l \cdot s^{-1}$ para identificar la pendiente y el sitio idóneo para la toma de muestras; en este trabajo se presenta el análisis de 3 aforadores con capacidades medición de caudales de 250, 500 y 1000 $l \cdot s^{-1}$; donde para probar su uso, se han realizado simulaciones numéricas del comportamiento del flujo utilizando el programa Iber® 2.5.2, e incluyendo hidrogramas que asemejan al proceso de tormentas de corta duración

Material y metodología

Utilizando el programa WinFlume® v.2.0 (Bautista *et al.,* 2020) se diseñaron 3 aforadores de garganta larga, con geometría rectangular, proponiendo un material de construcción con rugosidad absoluta k_s de 0.00015 m (concreto bien acabado), para rangos de operación con caudales de 25-250 l·s^{-1}, 35-500 l·s^{-1} y 50-1000 l·s^{-1}. Se obtuvo la tabla de aforo de cada estructura, cuyos datos fueron utilizados para graficar las curvas caudal-profundidad de flujo (Q-h), y ajustarlos a una ecuación característica de vertedores (Saul, 1997):

$$Q = k \cdot h^n \qquad \text{Ecuación (1)}$$

Donde
Q: Caudal (l·s^{-1})
h: Profundidad del flujo (cm)
k y n: Constantes (adim.)

De esta ecuación se determinó el coeficiente de determinación (R^2) que representa el porcentaje de variabilidad en la variable dependiente, es decir, la varianza con respecto a la media (Chicco et al., 2021).

A cada estructura se le adicionó una rápida con las mismas dimensiones de la garganta, y una pendiente del 10%; además, se propusieron modificaciones en cada estructura para representar las alteraciones que sufre por la acumulación de sedimentos generando dos escenarios de simulación:

Escenario 1: Geometría original del aforador diseñado

Contempla las dimensiones obtenidas originalmente con el programa de diseño de aforadores, añadiendo solamente una rápida; en la tabla 1, se muestran las dimensiones de cada estructura, indicando solamente la longitud de la sección de convergencia puesto que su anchura y profundidad coinciden en un extremo con el canal de entrada y en el otro con la garganta.

Tabla 1. Dimensiones de las estructuras de aforo diseñadas.

		Aforador A (Q = 250 l·s^{-1})	Aforador B (Q = 500 l·s^{-1})	Aforador C (Q = 1000 l·s^{-1})
Canal de entrada (Sección I)	Longitud (m)	0.60	0.80	1.00
	Ancho de base (m)	0.90	1.20	1.40
	Profundidad (m)	0.60	0.70	1.02
Convergencia (Sección II)	Longitud (m)	0.40	0.40	0.75
Garganta o Sección de control (Sección III)	Elev. sobre canal de entrada (m)	0.10	0.15	0.20
	Longitud (m)	0.60	0.90	1.02
	Ancho de base (m)	0.60	0.90	1.00
	Profundidad (m)	0.50	0.55	0.82
Rápida (Sección IV)	Longitud horizontal (m)	0.60	0.90	1.02
	Pendiente (%)	10.00	10.00	10.00

Escenario 2: Geometría modificada del aforador diseñado suponiendo acumulación de sedimentos

Se modificó la elevación del fondo del canal de entrada y sección de convergencia, igualándolas con la elevación del fondo de la garganta; dando lugar a estructuras que solamente cuentan con contracciones laterales y reduciéndose la profundidad en el canal de entrada.

Como ejemplo, la figura 1 muestra una vista de la geometría original y la modificada de las estructuras usadas en las simulaciones.

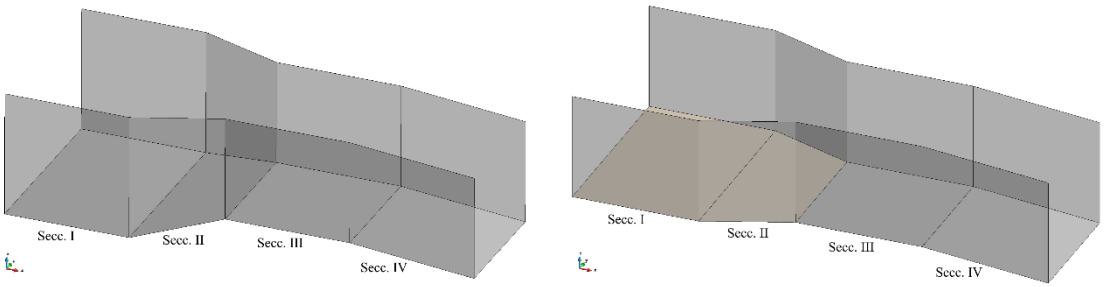


Figura 1. Vista tridimensional de la geometría propuesta para los aforadores (a la izquierda estructura original y derecha estructura modificada).

Determinación de los valores de rugosidad (n) para las estructuras de aforo propuestas

Considerando las características hidráulicas de la entrada de la estructura (área hidráulica, perímetro mojado, diámetro hidráulico), rugosidad relativa y número de Reynolds; se calculó un valor de coeficiente de Manning para cada caudal reportado en la tabla de aforos utilizando la ecuación 2, que se basa en las aportaciones de Haaland (1983):

$$n = R_h^{1/6} \frac{1}{\sqrt{8g}} \left(\frac{1}{-1.8log\left(\frac{6.9}{Re} + \left(\frac{k}{14.8R_h}\right)^{1.11}\right)} \right) \qquad \text{Ecuación (2)}$$

Donde
n: Coeficiente de rugosidad de Manning (adim.)
g: Constante de aceleración de la gravedad (m·s^{-2})
R_h: Radio hidráulico (m)
f: Factor de fricción de Darcy (adim.)
k: Rugosidad absoluta (m)
D: Diámetro hidráulico (m) y
Re: Número de Reynolds (adim.).

Obteniendo un valor promedio para cada aforador, 0.0128 para el aforador A, 0.0129 para el aforador B y 0.0130 para el aforador C.

Simulación numérica del flujo de agua en los aforadores

La simulación del flujo de agua en las estructuras de aforo se llevó a cabo en el entorno del programa Iber® v.2.5.2, el cual resuelve las ecuaciones bidimensionales de St.Venant, incorporando los efectos de la turbulencia y rozamiento superficial por viento (Bladé *et al.,* 2014).

La configuración de los modelos geométricos para cada aforador propuesto y su variante se realizó de acuerdo con las indicaciones de Cea *et al.* (2019), usando un coeficiente de rugosidad de Manning para las paredes según lo especificado: 0.0128 para el aforador A, 0.0129 para aforador B y 0.0130 para el aforador C, excepto en la parte inferior de la sección de entrada y convergencia de los aforadores modificados, en cuyo caso se utilizó un coeficiente de 0.023, de acuerdo a las características del material depositado (Chow, 1988).

La discretización de la superficie se basó en un mallado estructurado que consistió en elementos de 1 cm para el aforador A, de 1.5 cm para el aforador B y de 2 cm para el aforador C; como condición de frontera en la entrada de los aforadores, se utilizó un hidrograma sintético que se construyó utilizando las coordenadas del Hidrograma Unitario Adimensional (HUA) (NRCS, 2007), proponiendo un tiempo pico para el desarrollo de cada tormenta y un caudal pico superior al de diseño de los aforadores, tal como se indica en la tabla 2.

Tabla 2. Datos de construcción de los hidrogramas utilizados en las simulaciones de funcionamiento hidráulico de los aforadores.

	Caudal pico (Q_p)	Tiempo pico (T_p)	Duración de la tormenta
HUA 250	Q-252 $l \cdot s^{-1}$	30 min	150 min
HUA 500	Q-510 $l \cdot s^{-1}$	50 min	250 min
HUA 1000	Q-1010 $l \cdot s^{-1}$	80 min	400 min

En ambos casos la condición de frontera en la salida se definió como flujo en régimen supercrítico, además se utilizó el modelo de turbulencia $k - \varepsilon$. Dado que se utilizaron hidrogramas, la simulación se realizó en régimen no permanente usando un tiempo máximo de simulación igual al calculado para la duración de la tormenta con intervalos de resultados a cada 3 minutos para el aforador A (250 $l \cdot s^{-1}$), cada 5 minutos para el aforador B (500 $l \cdot s^{-1}$) y cada 8 minutos para el aforador C (1000 $l \cdot s^{-1}$).

Mediciones y procesamiento de resultados

Se realizaron 25 mediciones de profundidad (h), distribuidas a lo largo de duración de la tormenta, para un rango de valores de caudal válidos para los diseños. De acuerdo con los requerimientos especificados por el diseño, las lecturas a la entrada de los aforadores se realizaron de acuerdo con lo siguiente:

- Aforador A. Medición localizada 0.40 m aguas arriba del inicio de la convergencia
- Aforador B. Medición localizada 0.60 m aguas arriba del inicio de la convergencia
- Aforador C. Medición localizada 0.80 m aguas arriba del inicio de la convergencia

El sitio de mediciones de profundidad (h) en las rápidas se localizó a la mitad de éstas, en los tres aforadores, y para cada aforador se midieron 7 puntos distribuidos transversalmente a la longitud de la rápida, a los cuales se tomó el promedió para considerarlo como la profundidad (h) para medición en la toma.

Se midieron valores de profundidad (h) obtenidos con Iber® a la entrada de los aforadores para un caudal conocido y se calculó el caudal correspondiente de acuerdo con las ecuaciones obtenidas con WinFlume®; luego se analizaron las diferencias usando 2 indicadores estadísticos: Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE) y la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE), expresados matemáticamente en las ecuaciones 3 y 4 (Sharu & Razak, 2020).

$$\text{MAPE} = \frac{100}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{\left|y_{obs,i} - y_{model,i}\right|}{y_{obs,i}} \qquad \text{Ecuación (3)}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(y_{obs,i} - y_{model,i}\right)^2}{N}} \qquad \text{Ecuación (4)}$$

Donde
$y_{obs,i}$: Valor pronosticado con WinFlume
$y_{model,i}$: Valor obtenido de la simulación numérica, y
N: Número de datos analizados.

Finalmente, utilizando los mismos indicadores mostrados en las ecuaciones 3 y 4 se evaluó la variación existente para la profundidad (h) desarrollada en la rápida, comparando los datos obtenidos en la estructura diseñada originalmente con la estructura modificada. Además, se construyeron las curvas Q-h para el sitio de medición en la rápida los cuales se ajustaron a un modelo potencial de la forma de la ecuación (1) con su correspondiente coeficiente de determinación (R^2).

Resultados y discusión

Partiendo de los resultados obtenidos de las tablas de aforo correspondientes a cada estructura diseñada (ver tabla 7 en la sección de anexos), en la figura 2 se muestran las gráficas Q-h propias de los aforadores estudiados, con su correspondiente ecuación de caudal ajustado y coeficiente de determinación (R^2); mientras que en la figura 3 se muestran los hidrogramas sintéticos construidos.

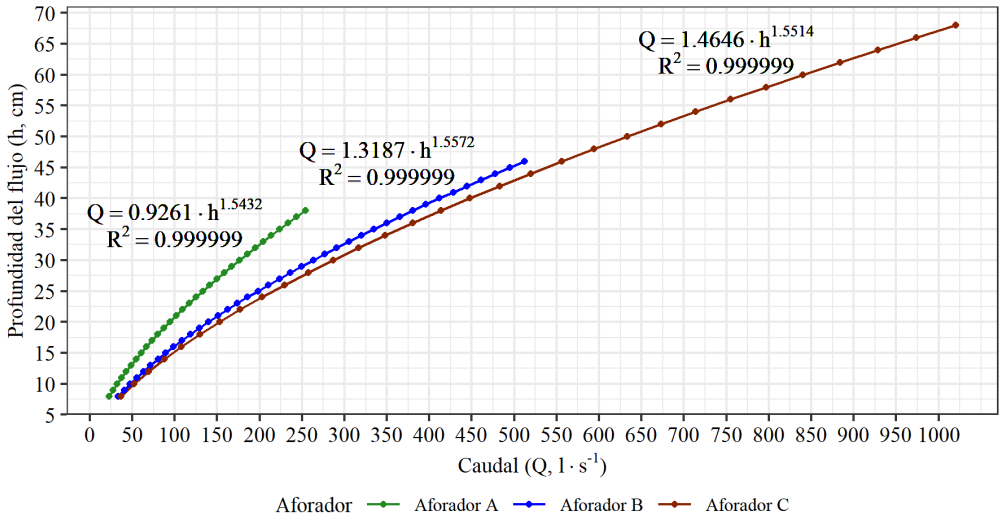


Figura 2. Relación Q-h determinada en la entrada de las estructuras de aforo propuestas, así como su ecuación ajustada.

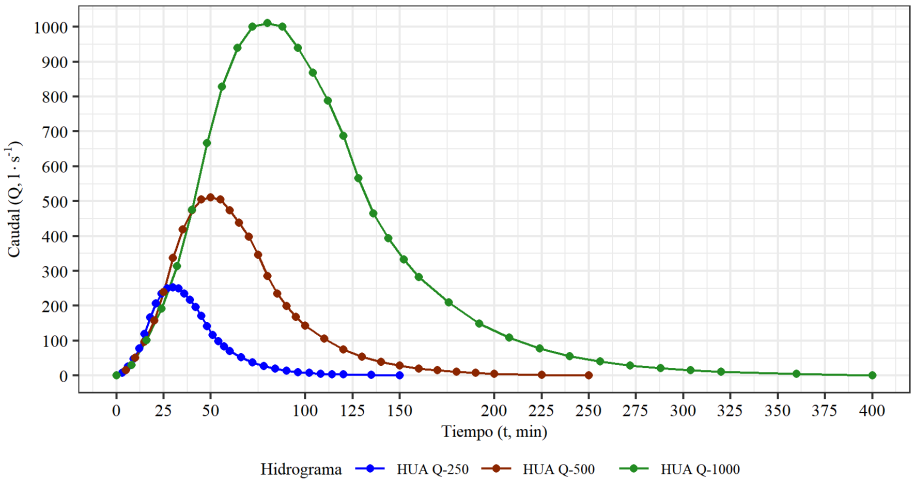


Figura 3. Hidrogramas utilizados en las simulaciones del funcionamiento de la estructura de aforo.

A manera de ejemplo, en la figura 4 se muestra una vista tridimensional de la superficie del agua cuando circula por el aforador A, un caudal de aproximadamente 70 l·s^{-1}, (para un tiempo de una hora en el hidrograma), tanto en el aforador original, como en el modificado.

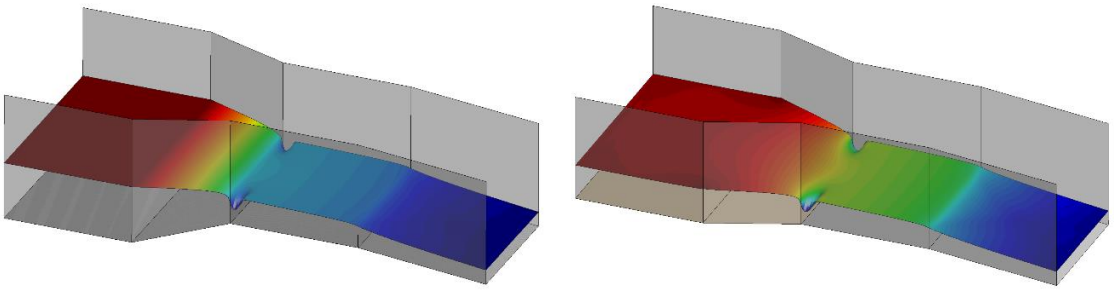


Figura 4. Procesamiento de los resultados de la simulación, vista tridimensional de la superficie del agua en el aforador uno, un caudal aproximado de 70 $l \cdot s^{-1}$.

Por otra parte, en la tabla 3, se muestran los tiempos (t) y caudales específicos del hidrograma utilizado (Q_h), así como el valor de profundidad de flujo obtenido con las simulaciones realizadas en Iber® (h_i)y el caudal calculado (Q_c), a partir de las ecuaciones ajustadas.

Tabla 3. Caudales propuestos (hidrograma), profundidad (h) obtenida con la simulación en Iber® y caudales calculados con la ecuación obtenida de Winflume.

Aforador 1 (250 $l \cdot s^{-1}$)				Aforador 2 (500 $l \cdot s^{-1}$)				Aforador 3 (1000 $l \cdot s^{-1}$)			
t (s)	Q_h ($l \cdot s^{-1}$)	h_i (cm)	Q_c ($l \cdot s^{-1}$)	t (s)	Q_h ($l \cdot s^{-1}$)	h_i (cm)	Q_c ($l \cdot s^{-1}$)	t (s)	Q_h ($l \cdot s^{-1}$)	h_i (cm)	Q_c ($l \cdot s^{-1}$)
360	25.20	8.61	25.66	900	51.00	10.53	51.58	16.00	101.00	15.33	101.12
540	47.88	13.06	48.85	1200	96.90	15.94	98.31	24.00	191.90	23.22	192.58
720	78.12	17.96	79.88	1500	158.10	21.87	160.89	32.00	313.10	31.86	314.68
900	118.44	23.57	121.49	1800	239.70	28.63	244.81	40.00	474.70	41.70	477.80
1080	166.32	29.44	171.16	2100	336.60	35.69	344.95	48.00	666.60	51.96	672.10
1260	206.64	33.94	213.25	2400	418.20	41.10	429.71	56.00	828.20	59.82	836.18
1440	234.36	36.86	242.23	2700	474.30	44.61	488.23	64.00	939.30	64.91	949.15

1620	249.48	38.41	258.08	3000	504.90	46.46	520.13	72.00	999.90	67.61	1011.04
1800	252.00	38.67	260.76	3300	510.00	46.77	525.51	80.00	1010.00	68.05	1021.44
1980	249.48	38.42	258.22	3600	504.90	46.47	520.35	88.00	999.90	67.61	1011.22
2160	234.36	36.89	242.55	3900	474.30	44.63	488.65	96.00	939.30	64.93	949.72
2340	216.72	35.05	224.11	4200	438.60	42.42	451.38	104.00	868.60	61.72	877.80
2520	196.56	32.88	203.07	4500	397.80	39.81	408.95	112.00	787.80	57.92	795.48
2700	171.36	30.07	176.85	4800	346.80	36.43	356.12	120.00	686.80	53.01	693.28
2880	141.12	26.49	145.48	5100	285.60	32.12	292.78	128.00	565.60	46.76	570.59
3060	115.92	23.30	119.32	5400	234.60	28.28	240.09	136.00	464.60	41.17	468.36
3240	98.28	20.92	101.04	5700	198.90	25.41	203.25	144.00	393.90	37.00	396.86
3420	83.16	18.76	85.42	6000	168.30	22.81	171.78	152.00	333.30	33.21	335.66
3600	70.56	16.86	72.44	6600	142.80	20.51	145.63	160.00	282.80	29.87	284.69
3960	52.16	13.86	53.52	7200	105.57	16.88	107.51	176.00	209.07	24.58	210.35
4320	37.04	11.10	38.03	7800	74.97	13.54	76.26	192.00	148.47	19.71	149.35
4680	26.96	9.04	27.71	8400	54.57	11.04	55.51	208.00	108.07	16.06	108.71
5040	19.40	7.32	19.98	9000	39.27	8.94	39.98	224.00	77.77	13.00	78.29
5400	13.86	5.90	14.33	9600	28.05	7.22	28.63	240.00	55.55	10.47	56.00

De análisis realizado, se encontró que los valores determinados con la ecuación ajustada por WinFlume® fueron muy cercanos a los caudales utilizados en las simulaciones, con valores muy pequeños para los errores calculados (tabla 4); por

lo que se determinó que los resultados obtenidos con las simulaciones realizadas en Iber® son adecuados

Tabla 4. Estadísticos determinados para los resultados de las simulaciones hidráulicas a la entrada de las estructuras de aforo.

	Indicador estadístico	
	MAPE (%)	RMSE ($l \cdot s^{-1}$)
Aforador A (Q = 250 $l \cdot s^{-1}$)	1.50	2.50
Aforador B (Q = 500 $l \cdot s^{-1}$)	1.16	4.34
Aforador C (Q = 1000 $l \cdot s^{-1}$)	0.79	6.54

Por lo tanto, se usaron las mediciones realizadas en la rápida para obtener la ecuación ajustada de la forma $Q = k \cdot h^n$ con su respectivo coeficiente de determinación (R^2), tal como se muestra en la tabla 5, mientras que la gráfica de curvas se muestra en la figura 5.

Tabla 5. Estadísticos determinados para los resultados de las simulaciones hidráulicas muestreado en la rápida de la estructura de aforo.

	Ecuación ajustada	R^2
Aforador A	$Q = 4.7566 \cdot h^{1.3150}$	0.999955
Aforador B	$Q = 7.3571 \cdot h^{1.3165}$	0.999959
Aforador C	$Q = 8.8126 \cdot h^{1.3146}$	0.999957

Q: caudal ($l \cdot s^{-1}$); h: profundidad del flujo (cm);

Los resultados indican un buen desempeño de la estructura aforadora propuesta, en la sección añadida al diseño original, constituyendo una buena alternativa para la colocación de un pozo para la toma de datos. Además, se encontró una variación mínima para los distintos caudales simulados comparando la estructura modificada con respecto al diseño original, pues como se puede observar en la tabla 6, el valor de los errores calculados es muy cercano a cero.

Tabla 6. Estadísticos determinados para los resultados de las simulaciones hidráulicas en la rápida de la estructura de aforo.

	Indicador estadístico	
	MAPE (%)	RMSE (cm)
Aforador A (Q = 250 l·s^{-1})	0.55%	0.088
Aforador B (Q = 500 l·s^{-1})	0.14%	0.041
Aforador C (Q = 1000 l·s^{-1})	0.02%	0.002

Respecto de las curvas Q-h determinadas con los datos muestreados en la rápida, es notoria la similitud que guarda con las curvas determinadas a la entrada de la estructura; dado que la única diferencia es la reducción de los valores de profundidad de flujo que corresponden a un mismo caudal.

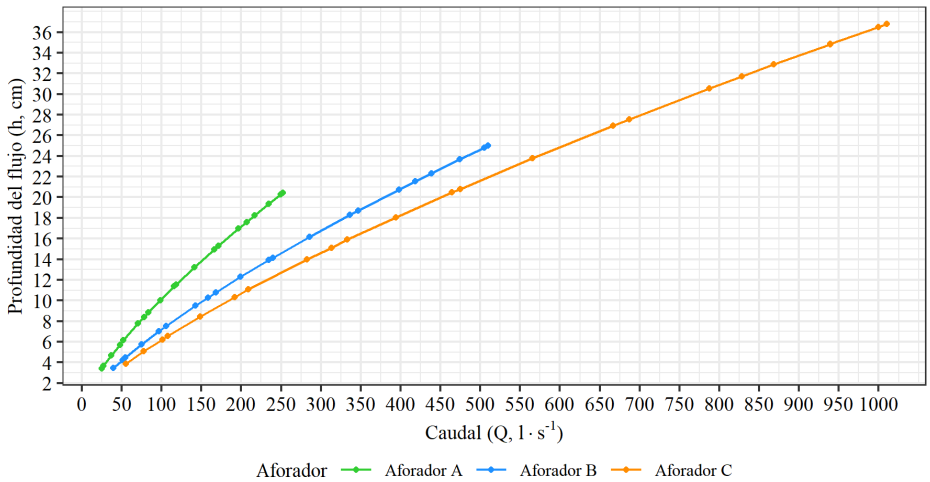


Figura 5. Relación Q-h determinada en la rápida de las estructuras de aforo propuestas sin sedimentos.

Conclusiones

De acuerdo con los análisis realizados para la propuesta de aforador, encontramos que el diseño puede ser viable para su construcción, pues de las simulaciones realizadas se encontró una variación máxima de 1.5% para el aforador de menor capacidad, mientras que el error presentado en el aforador de mayor capacidad apenas se aproxima al 1%. Bajo esta premisa, podemos considerar que existe un excelente desempeño en el ámbito de los aforadores, sobre todo si pensamos en la

posibilidad de toma de lecturas sin que exista la problemática de obstrucciones por sedimentación. Asimismo, en este trabajo se presentó como propuesta que la rápida adicionada a los aforadores sea similar a la sección de control o garganta en cuanto a dimensiones, encontrando para los tres casos un coeficiente de determinación (R^2) prácticamente del mismo valor, lo que se podría tomar como una regla de las propuestas de diseño.

Los resultados indican que la propuesta de estructura constituye una solución confiable ante la necesidad de medir volúmenes de agua, pudiendo incluso diseñar estructuras de mayor capacidad. Por otra parte, dado que siempre se obtendrán resultados más precisos al hacer mediciones aguas arriba de la garganta, la propuesta de diseño y operación consiste en tomar lecturas de manera simultánea y solo complementar os datos con las mediciones realizadas en la rápida.

Anexos (Referencias bibliográficas)

Bautista, E., Schlegel, J.L, Wahl, T.L., Clemmens, A.J., Replogle, J.A. (2020). WinFlume 2.0. Software for Design and Calibration of Long-Throated Flumes and Broad-CrestedWeirs for Open-Channel Water Flow Measurement. Software and User Manual. USDA-Agricultural Research Service (Maricopa, AZ) and USDI-Bureau of Reclamation (Denver, CO). USA.

Bittelli, M. (2010). Measuring Soil Water Potential for Water Management in Agriculture: A Review. Sustainability, 2(),1226-1251. doi:10.3390/su2051226

Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J. y Coll, A. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo y Diseño En Ingeniería. 30(1), 1–10. doi:10.1016/j.rimni.2012.07.004

Carrillo, G. M. (1999). Sediment-resistant flume for hydrologic measurements. [Tesis doctoral, Universidad de Arizona]. Repositorio institucional – Universidad de Arizona.

Castro-Orgaz, O., Mateos, L. (2014). Water Discharge Measurement in Agricultural Catchments Using Critical Depth Flumes Affected by Sediment Deposition. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 140(3), 04013018. doi:10.1061/(asce)ir.1943-4774.0000672

Cea, G. L., Bladé, I. C. E., Sanz, R. M., Bermúdez P. M., Mateos, A. A. (2019). Iber applications basic guide. A Coruña. Universidade da Coruña, Servizo de Publicacións. ISBN: 978-84-9749-717-6. 105 pp. doi:10.17979/spudc.9788497497176

Chicco D, Warrens M, J., Jurman G. (2021). The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. PeerJ Computer Science 7:e623 https://doi.org/10.7717/peerj-cs.623

Chow, Ven Te. (1988). Open-Channel Hydraulics, McGraw-Hill Book Company, New York USA, 680 pp.

Clemmens A. J., Wahl T. L., Bos M. G., Reploge J. A. (2001). Water measurement with Flumes and Weirs. International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI). Publication 58. Wageningen, The Netherlands. 382p.

Göğüş, M., Altinbilek, D. (1994). Flow-Measurement Structures of Compound Cross Section for Rivers. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 120(1), 110–127. doi:10.1061/(asce)0733-9437(1994)120:1(110)

Gowing, J.W., Tuong, T.P., Hoanh, C.T., 2006. Land and water management in coastal zones: dealing with agriculture-aquaculture-fishery conflicts. In: Environmental Livelihoods in Hoanh, C. T., Tuong, T. P., Gowing, J. W., Hardy, B., (Eds.).*Tropical Coastal Zones: Managing Agriculture-Fishery-Aquaculture Conflicts*, CABI Publishing, London. 1-16.

Haaland, S. E. (1983). Simple and Explicit Formulas for the Friction Factor in Turbulent Pipe Flow. Journal of Fluids Engineering, 105(1), 89. doi:10.1115/1.3240948

Natural Resources Conservation Service (NRCS). 2007. Hydrographs. En U.S. Department of Agriculture (USDA) (Ed.). 2007. National Engineering Handbook. 50 pp.

Sánchez, V. A. S., García, N. R. M., Palma, T. A. (2003). La cuenca hidrográfica: unidad básica de planeación y manejo de recursos naturales. Ed. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F. 47 p.

Saul, A. J. 1997. Combined Sewer Overflows. In Sewers: Rehabilitation and New Construction Repair and Renovation. Read G. F. and Vickridge I. G. (eds.). 1st ed. Butterworth-Heinemann. Oxford, UK. 283-317 pp.

Sharu, E. H., Ab Razak, M. S. (2020). Hydraulic Performance and Modelling of Pressurized Drip Irrigation System. Water, 12(8), 2295. doi:10.3390/w12082295

Smith, R. E., Chery, D. L., Renard, K. G., Gwinn, W. R. (1981). Supercritical flow flumes for measuring sediment-laden flow. Technical Bulletin number 1655. Agricultural Research Service. United States Department of Agriculture.

Tabla 7. Tabla d aforo y variables hidráulicas de importancia, determinadas con WinFlume a la entrada de los aforadores diseñados.

Aforador de 250 l·s^{-1}				Aforador de 500 l·s^{-1}				Aforador de 1000 l·s^{-1}			
h	Q	Fr	v	h	Q	Fr	v	h	Q	Fr	v
(cm)	(l·s^{-1})	(Fr)	(m·s^{-1})	(h, cm)	(Q, l·s^{-1})	(Fr)	(m·s^{-1})	(cm)	(l·s^{-1})	(Fr)	(m·s^{-1})
8	22.9530	0.1070	0.1420	8	33.6990	0.0810	0.1220	8	36.9170	0.0570	0.0940
9	27.5130	0.1180	0.1610	9	40.4580	0.0920	0.1400	10	52.1880	0.0720	0.1240
10	32.3590	0.1280	0.1800	10	47.6460	0.1010	0.1590	12	69.2300	0.0870	0.1550
11	37.4780	0.1380	0.1980	11	55.2440	0.1110	0.1770	14	87.9060	0.1010	0.1850
12	42.8590	0.1470	0.2160	12	63.2390	0.1200	0.1950	16	108.1150	0.1140	0.2150
13	48.4900	0.1560	0.2340	13	71.6140	0.1290	0.2130	18	129.7680	0.1260	0.2440
14	54.3660	0.1640	0.2520	14	80.3580	0.1370	0.2310	20	152.7930	0.1380	0.2730
15	60.4750	0.1720	0.2690	15	89.4580	0.1450	0.2480	22	177.1280	0.1480	0.3010
16	66.8100	0.1790	0.2860	16	98.9030	0.1520	0.2660	24	202.7240	0.1580	0.3290
17	73.3650	0.1860	0.3020	17	108.6850	0.1600	0.2830	26	229.5250	0.1680	0.3560
18	80.1330	0.1920	0.3180	18	118.7980	0.1670	0.3000	28	257.4910	0.1770	0.3830
19	87.1100	0.1980	0.3340	19	129.2280	0.1730	0.3170	30	286.5860	0.1850	0.4090
20	94.2890	0.2040	0.3490	20	139.9710	0.1800	0.3330	32	316.7730	0.1930	0.4350
21	101.6660	0.2090	0.3640	21	151.0180	0.1860	0.3500	34	348.0180	0.2000	0.4600
22	109.2370	0.2140	0.3790	22	162.3650	0.1920	0.3660	36	380.2980	0.2070	0.4850
23	116.9950	0.2190	0.3940	23	174.0020	0.1980	0.3820	38	413.5820	0.2140	0.5090

24	124.9360	0.2240	0.4080	24	185.9290	0.2030	0.3970	40	447.8350	0.2200	0.5330
25	133.0600	0.2280	0.4220	25	198.1360	0.2080	0.4130	42	483.0530	0.2260	0.5570
26	141.3620	0.2320	0.4360	26	210.6200	0.2130	0.4280	44	519.2050	0.2310	0.5790
27	149.8370	0.2360	0.4500	27	223.3760	0.2180	0.4430	46	556.2700	0.2370	0.6020
28	158.4830	0.2400	0.4630	28	236.3980	0.2230	0.4580	48	594.2290	0.2420	0.6240
29	167.2960	0.2440	0.4770	29	249.6820	0.2280	0.4730	50	633.1060	0.2470	0.6460
30	176.2880	0.2470	0.4900	30	263.2240	0.2320	0.4870	52	672.8540	0.2510	0.6680
31	185.441	0.251	0.503	31	277.02	0.236	0.502	54	713.438	0.2560	0.6890
32	194.77	0.254	0.515	32	291.059	0.24	0.516	56	754.858	0.2600	0.7090
33	204.24	0.257	0.528	33	305.352	0.244	0.53	58	797.092	0.2640	0.7300
34	213.866	0.26	0.54	34	319.887	0.248	0.544	60	840.125	0.2680	0.7500
35	223.643	0.263	0.552	35	334.661	0.252	0.558	62	883.945	0.2720	0.7700
36	233.571	0.266	0.564	36	349.668	0.255	0.571	64	928.538	0.2750	0.7900
37	243.647	0.268	0.576	37	364.912	0.259	0.585	66	973.893	0.2790	0.8090
38	253.869	0.271	0.588	38	380.385	0.262	0.598	68	1019.997	0.2820	0.8280
				39	396.084	0.266	0.611				
				40	412.008	0.269	0.624				
				41	428.153	0.272	0.637				
				42	444.517	0.275	0.65				

				43	461.096	0.278	0.662				
				44	477.912	0.281	0.675				
				45	494.94	0.283	0.687				
				46	512.178	0.286	0.7				

h: Profundidad de flujo, Q: Caudal, Fr: Número de Froude, v: Velocidad

ACODAL
ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
65° CONGRESO INTERNACIONAL
Agua, Saneamiento, Ambiente y Energías Renovables
Bogotá - Colombia
Centro de Convenciones Ágora
Julio 13, 14 y 15 de 2022

"EL DESPERTAR DE LA CONCIENCIA AMBIENTAL"

"Ramón Merino Loo"

Resumen

En las últimas décadas los seres humanos hemos excedido el límite de convivencia con el medio ambiente en aras de una vida "más confortable".

La conciencia ambiental se define como el entendimiento que se tiene del impacto de los seres humanos en el entorno, de cómo cada una de nuestras acciones influyen en el medio ambiente y por consiguiente en todo lo que nos rodea y en nuestro estilo de vida.

Así pues, "Conciencia Ambiental" es motivar para desarrollar una convicción de las personas, organizaciones, grupos o una sociedad entera de que los recursos naturales deben protegerse y usarse racionalmente en beneficio del presente y el futuro de la humanidad, desde un punto de vista propio y de desarrollo económico y bienestar social.

En esta plática las personas deben entender que sus actos individuales y colectivos afectan a los demás y a su destino.

La conciencia ambiental es una filosofía de vida que se preocupa por el medio ambiente y lo protege con el fin de conservarlo.

En respuesta a esta preocupación presentamos los diferentes mecanismo que se han desarrollado entre las naciones como un compromiso en el que se tratan temas relacionados con el medio ambiente, salud, residuos y cambio climático con la finalidad de lograr un desarrollo sostenible que nos permita vivir con respeto hacia la diversidad y los recursos del planeta.

Palabras clave: Cambio climático, Desarrollo sustentable, Medio ambiente, Residuos, Salud.

"THE AWAKENING OF ENVIRONMENTAL AWARENESS"

Abstract

In the last decades, human beings have exceeded the limit of coexistence with the environment for the sake of a "more comfortable" life.

Environmental awareness is defined as a compendium we have of the impact of human beings on the environment, how each of our actions influences the environment and therefore everything that surrounds us and our lifestyle.

So, "Environmental Awareness" is a motivation to develop conviction in people, organizations, groups or an entire society that natural resources must be protected and used rationally for the benefit of the present and future of humanity, from a personal of point of view. and of economic development and social welfare.

In this talk, people must understand that their individual and collective acts affect others and their destiny.

Environmental awareness is a philosophy of life that cares about the environment and protects it in order to conserve it.

In response to this concern, we present different mechanisms that have been developed among nations as a commitment to treat issues related to the environment, health, waste and climate change in order to achieve sustainable development that allows us to live with respect for diversity and the planet's resources.

***KeyWords** : Climate change, Sustainable development, Environment, Waste, Health.*

"El DESPERTAR DE LA CONCIENCIA AMBIENTAL"

Resumen

El planeta tierra se formó hace millones de años, cuando el sistema solar comenzó a tomar forma y desde entonces había prevalecido cierto equilibrio entre los seres vivos y su ecosistema. Sin embargo, la evolución del ser humano y el uso desmedido de los recursos en su afán de una vida más confortable han alterado nuestro medio ambiente al grado que estamos destruyendo no solo los recursos naturales sino ecosistemas completos y la vida aminal y vegetal que hay en ella.

La conciencia ambiental se define como el entendimiento que se tiene del impacto de los seres humanos en el entorno. Es decir, tratar de hacer entender cómo influyen nuestras acciones de cada día en el medio ambiente y como esto afecta en nuestro espacio.

Esta problemática se ha convertido en un tema global ya que esto afectará irremediablemente a las futuras generaciones, pues se vislumbra escasez y desigualdad de acceso de muchos recursos, inclusive los indispensables para cubrir las necesidades básicas de la población.

Es por esto que se han realizado diversas acciones de política ambiental a nivel internacional, así como estudios con la intención de preservar la diversidad y los recursos naturales a lo largo del tiempo al que se ha llamado “Desarrollo Sostenible”, ejemplo de ello es el Informe Brundtland, El Protocolo de Montreal, Cumbre de la Tierra, Protocolo de Kioto, por mencionar algunos.

Palabras clave: Cambio climático, Desarrollo sustentable, Medio ambiente, Residuos, Salud.

Introducción

La Revolución industrial es el proceso de transformación económica, social y tecnológica que se inicio en la segunda mitad del siglo XVIII (1760) en el reino de Gran Bretaña, que se extendió unas décadas después a gran parte de Europa occidental y América Anglosajona, y que concluyó entre 1820 y 1840 (siglo XIX). Durante este periodo se vivió el mayor conjunto de transformaciones económicas, tecnológicas y sociales de la historia de la humanidad desde el Neolítico, que vio el paso desde una economía rural basada fundamentalmente en la agricultura y el comercio a una economía de carácter urbano, industrializada y mecanizada.

Este desarrollo trajo consigo el aumento de los gases responsables del efecto invernadero, lo que se piensa también influyo en el comienzo del calentamiento global de la tierra, a partir de ella muchas otras consecuencia se han presentado como la deforestación, la quema de combustibles fósiles y su alto contenido en carbono, así como la gran cantidad de plásticos que invaden nuestros mares.

Historia del Desarrollo Ambiental

La capacidad de poder mantener los aspectos biológicos en su productividad y diversidad a lo largo del tiempo y ocuparse por la preservación de los recursos naturales fomentando la responsabilidad ecológica fueron las primeras acciones de política ambiental a nivel internacional.

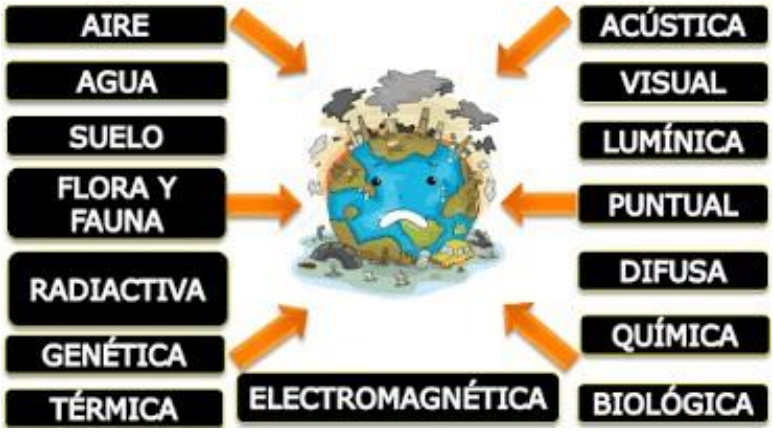
A principios de la década de 1970, eran pocos los países que contaban con leyes para regular el manejo del ambiente y de los recursos naturales. Dos acontecimientos de orden internacional marcaron las directrices de las políticas públicas en cuestión de medio ambiente y recursos naturales durante los últimos treinta años: la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente en 1972 en un primer momento y dos décadas más tarde la Conferencia de Río en 1992.

Se puede afirmar que el medio ambiente se convirtió en un asunto de importancia mundial a partir de la primera, también conocida como la Conferencia de Estocolmo, donde se reconoció el daño causado por el hombre en distintas regiones de la Tierra: Contaminación del agua, el aire, la tierra y los seres vivos; trastornos del equilibrio ecológico de la biosfera, destrucción y agotamiento de los recursos no renovables; así como el daño en el ambiente que rodea al ser humano, en donde vive y trabaja, con consecuencias nocivas a la salud.

En la Declaración de la conferencia se menciona que los llamados países del "Tercer Mundo", la mayoría de los problemas ambientales eran ocasionados por el ***subdesarrollo***, y, por el contrario, en los países industrializados los problemas ambientales eran motivados por el ***desarrollo tecnológico.***

Existen diferente tipos de contaminación, la contaminación del medio ambiente, en especial del aire o del agua, es producida por los residuos procedentes de la actividad humana o de procesos industriales o biológicos.

En respuesta a la continua preocupación por el deterioro de la capa de ozono, el calentamiento global y otros problemas medioambientales asociados con el aumento del nivel de vida de la población mundial y la industrialización, en 1983 se creó la ***Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo***, la cual fue presidida por Gro Harlem Brundtland.



La publicación del Informe Brundtland fue todo un hito histórico ya que por primera vez se registra el concepto de Desarrollo Sostenible. Así se dio por fin visibilidad a la problemática económica, social y medioambiental a la que nos venimos enfrentando desde hace décadas.

El ***Informe Brundtland*** incluye capítulos en los que no solo trata de temas relacionados exclusivamente con el desarrollo sostenible. También aborda otras temáticas como el papel de la economía internacional, energía e industria, y propuso principios legales de protección medioambiental.

El Protocolo de Montreal entró en vigor el 1 de enero de 1989 y solo controlaba 8 sustancias químicas, cinco CFC y tres halones. En virtud del Protocolo se controla la producción y el consumo de las sustancias que agotan la capa de ozono que tienen

mayor importancia desde el punto de vista comercial y ambiental. Estas sustancias están enumeradas en sus anexos y hoy en día llegan a 95 químicos.

En 1995 el ***Dr. José Mario Molina Pasquel Henríquez*** fue galardonado con el Premio Nobel de Química por su trabajo en Química atmosférica, particularmente en lo que respecta a la formación y descomposición del Ozono.

La Cumbre de la Tierra Río en 1992 trató 10 grandes temas. El principio 10, busca asegurar que toda persona tenga acceso a la información, participe en la toma de decisiones y acceda a la justicia en asuntos ambientales, con el fin de garantizar el derecho a un medio ambiente sano y sostenible de las generaciones presentes y futuras.

En esta importante cumbre sobre desarrollo sostenible, se identificaron tres procesos biofísicos en alto riesgo: la desertificación, la pérdida de biodiversidad y el cambio climático.

El ***Protocolo de Kioto*** se considera el primer gran esfuerzo contra el cambio climático, su objetivo es reducir las emisiones de seis gases de efecto invernadero que causan el calentamiento global en un porcentaje aproximado de al menos un 5 % en comparación a las emisiones a 1990:

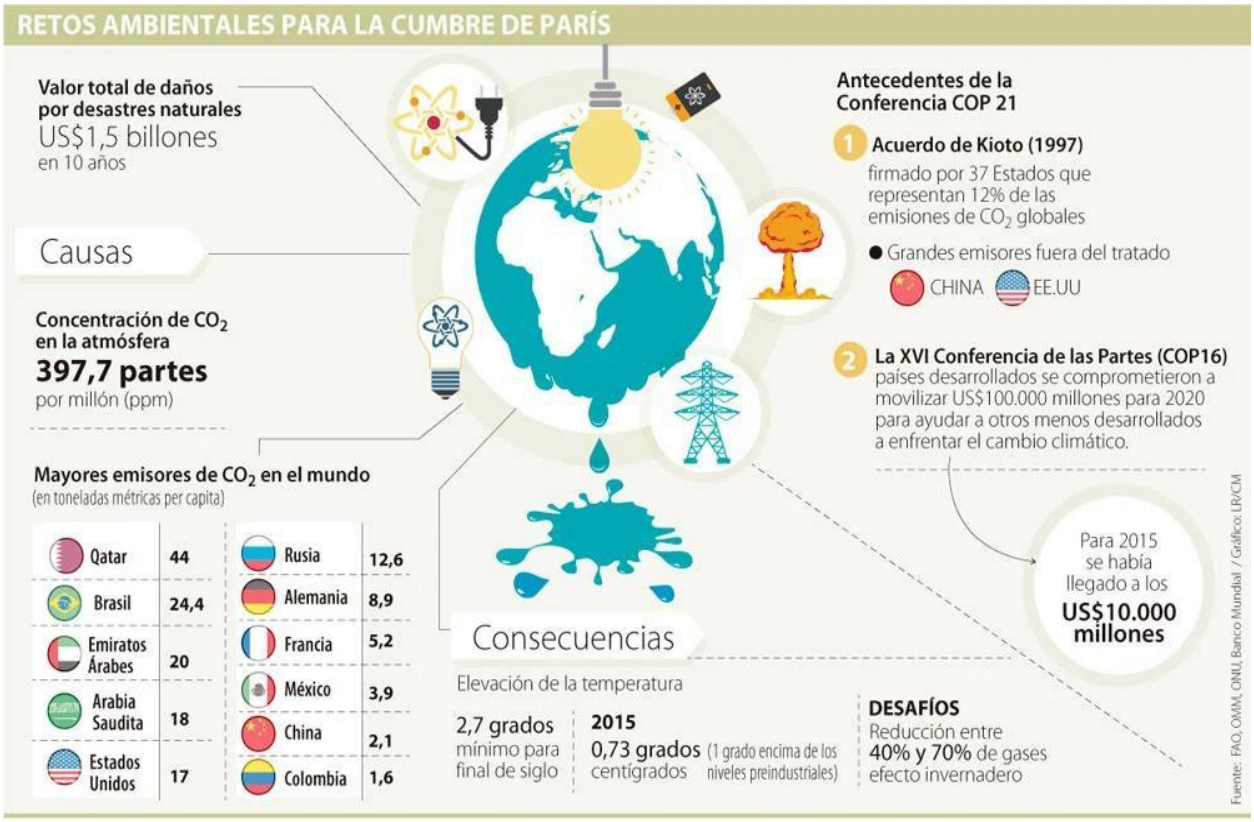
- Dióxido de Carbono (CO_2)
- Gas Metano (CH_4)
- Óxido Nitroso (N_2O)
- Hidrofluorocarbonos (HFC)
- Perfluorocarbonos (PFC)
- Hexafluoruro de Azufre (SF_6)

COPs

La primera **COP$_1$** (Conference of Parties) tuvo lugar en Berlín en 1995 y desde entonces, todos los años hay una nueva reunión de las partes para hablar, negociar y acordar de manera conjunta el problema del cambio climático.

En 2010 se llevo a cabo la **COP16/**CMP6 se realizó en Cancún México. En él se estableció limitar el incremento de la temperatura por debajo de los 2°, fortalecer el mecanismo de transferencia de tecnología, diseñar un marco de adaptación, implementar estrategias nacionales para REDD+ e implementar el Fondo Verde para el Clima.

Estas premisas se siguieron empujando y México fue uno de los primeros en firmar el Acuerdo de París durante la **COP21** con una participación destacada. En París se logró un acuerdo ambicioso, con metas claras de largo plazo, que incorpora compromisos diferenciados de acción para cada uno de los 196 países que conforman la Convención.



La **COP26** se celebró en Glasgow reunió a 120 líderes mundiales, y se llegó entre otros a los siguientes acuerdos:

Reconocimiento de la emergencia. Los países reafirmaron el objetivo del Pacto de París de limitar el incremento de la temperatura media mundial a 2 °C.

Intensificación de la acción por el clima. Los países subrayaron la urgencia de actuar "en esta década crítica", en la que las emisiones de dióxido de carbono deben reducirse un 45 % con el fin de alcanzar las emisiones netas cero para mediados de siglo.

Abandono de los combustibles fósiles. En la que quizás sea la decisión más controvertida de Glasgow, los países acabaron por acordar una disposición por la que se pide la reducción del carbón como fuente de energía y la eliminación gradual de los subsidios "ineficientes" a los combustibles fósiles.

El cambio climático, es real, está pasando ahora mismo. Es la amenaza más urgente a la que se enfrenta nuestra especie. Debemos trabajar juntos y dejar de perder el tiempo,

por los hijos de nuestros hijos y por toda la gente cuyas voces han sido apagadas por las políticas de la codicia.

Educación Ambiental

La extinción es la desaparición total de una especie en el planeta. Durante su larga historia ha habido muchas extinciones causadas por cambios climáticos, vulcanismo, inundaciones, sequías y la ***Presencia del Hombre***.

El Frailejón es una planta de tronco grueso, generalmente único, con hojas suculentas y muy velludas que se disponen en una apretada espiral formando una roseta en la parte superior del tallo. Las hojas muertas a lo largo de este, en lugar de caer, permanecen protegiéndolo. Esta serie de adaptaciones fisiológicas se deben a las drásticas condiciones climáticas de las alturas andinas (Frio, irradiación UV, estacionalidad diaria y escasez fisiológica de agua). Cumplen una gran función en los páramos de absorber el agua de las neblinas y conservarla. Los frailejones tienen una característica básica como crecer un centímetro cada año.

Entre las principales amenazas para los frailejones está la destrucción de su hábitat por el cambio de suelo, la expansión de la frontera agrícola, la ganadería, la minería y el cambio climático. A esto se suman otros desafíos: solo crecen un centímetro al año y su reproducción es muy compleja.

Esto es solo un ejemplo de lo que podemos prevenir e incluso revertir con la Educación Ambiental.

Según la ONU, la educación ambiental es un movimiento que promueve el respeto de cualquier generación hacia la Diversidad, el Medio Ambiente, y los recursos del planeta. Permite comprendernos a nosotros mismos y a los demás, además de forjar los vínculos que nos unen a los entornos naturales y sociales.

Objetivos de la Educación Ambiental

Conciencia Ambiental

Algunos la definen como la convicción de una persona, organización, grupo o una sociedad entera, de que los recursos naturales deben protegerse y usarse racionalmente en beneficio del presente y el futuro de la humanidad. Esa convicción se funda en valores ecológicos que determinan una conducta o un comportamiento ecológico positivo.

Para otros, la conciencia ambiental es una filosofía y un movimiento social relacionado con la conservación y mejora del medio ambiente, y esa forma de pensamiento busca influir mediante el activismo y la educación con el fin de proteger los recursos naturales y los ecosistemas.

Las principales características son: Comportamientos positivos de conducta. Educación permanente. Conocimientos técnicos y valores éticos. Enfoque global. Vinculación, interdependencia y solidaridad. Resolución de problemas, Iniciativa y sentido de la responsabilidad. Renovación del proceso educativo.

Población Mundial

Debemos admitir que el mundo seguirá creciendo, las más recientes proyecciones de las Naciones Unidas no prevén todavía un punto de inflexión en el crecimiento poblacional en el transcurso del presente siglo, pero se estima que, dadas las tendencias demográficas registradas, para mediados de siglo seremos alrededor de 9 mil 700 millones de habitantes en el planeta. La dinámica demográfica es la principal fuerza conductora del cambio ambiental global, pues constituye una presión para ocupar cada vez más espacios, explotar más recursos, producir más alimentos, consumir más agua, contaminar más, utilizar más energía y emitir más gases de efecto invernadero.

De la misma forma la esperanza de vida ha aumentado en todos los países debido al progreso en temas de salud, la esperanza de vida de las mujeres es ligeramente mayor a la esperanza de vida de los hombres. Esta diferencia está determinada tanto por el estrógeno como por la presencia del segundo cromosoma X en las mujeres; y es importante para la longevidad porque la grasa que rodea los órganos predice enfermedades cardiovasculares.

También indica que han incidido cambios en los hábitos ya que los hombres suelen fumar con más frecuencia que las mujeres. Nueva evidencia muestra que en los países ricos la ventaja femenina aumentó en parte porque las enfermedades infecciosas solían afectar a las mujeres de manera desproporcionada hace un siglo, por lo que los avances en la medicina redujeron la carga de salud a largo plazo de las enfermedades infecciosas.

Estos mismos avances, la urbanización, la cultura y el cambio en el rol de la mujer han disminuido la tasa de fertilidad ha disminuido.

¿Quién es Al Gore Una verdad incómoda? - Es el título de una película documental de director Davis Guggenheim acerca de la campaña del ex vicepresidente de Estados Unidos Al Gore para educar a los ciudadanos sobre el calentamiento global.

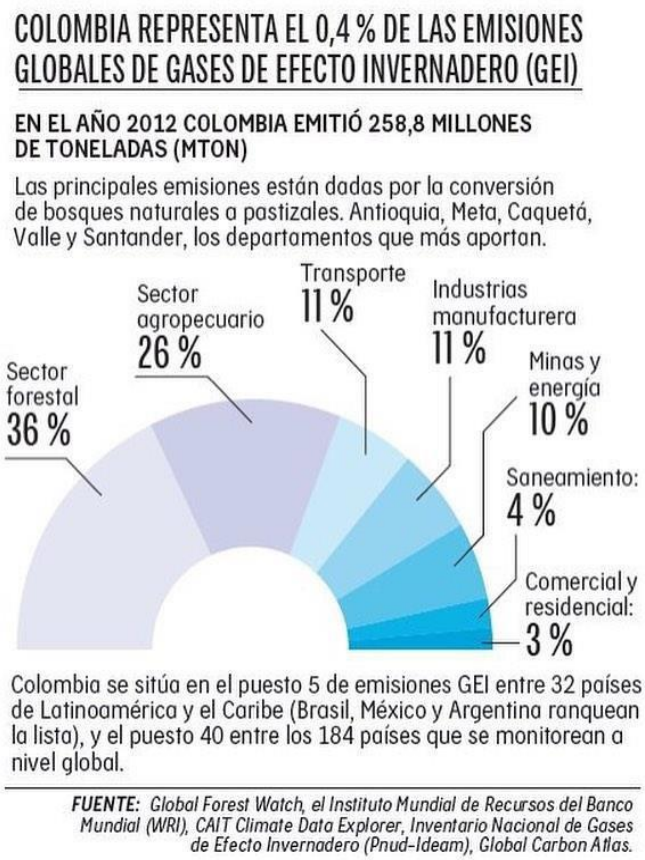
Tras exhibirse en el Festival de Cine de Sundance de 2006 y estrenarse en las ciudades de Nueva York y Los Ángeles el 24 de mayo de 2006, logró el éxito por parte de la crítica y el público, además de ganar dos premios Óscar por mejor documental y mejor canción original.3 Recaudó 24 millones USD en los EE. UU. y 26 millones USD en el extranjero, convirtiéndose en la décima película documental más taquillera hasta la fecha en los Estados Unidos.

Estadísticas

El Sistema de Información Ambiental de Colombia – SIAC, es el conjunto integrado de actores, políticas, procesos y tecnologías involucrados en la gestión de información ambiental del país para facilitar la generación de conocimiento, la toma de decisiones, la educación y la participación social para el desarrollo sostenible.

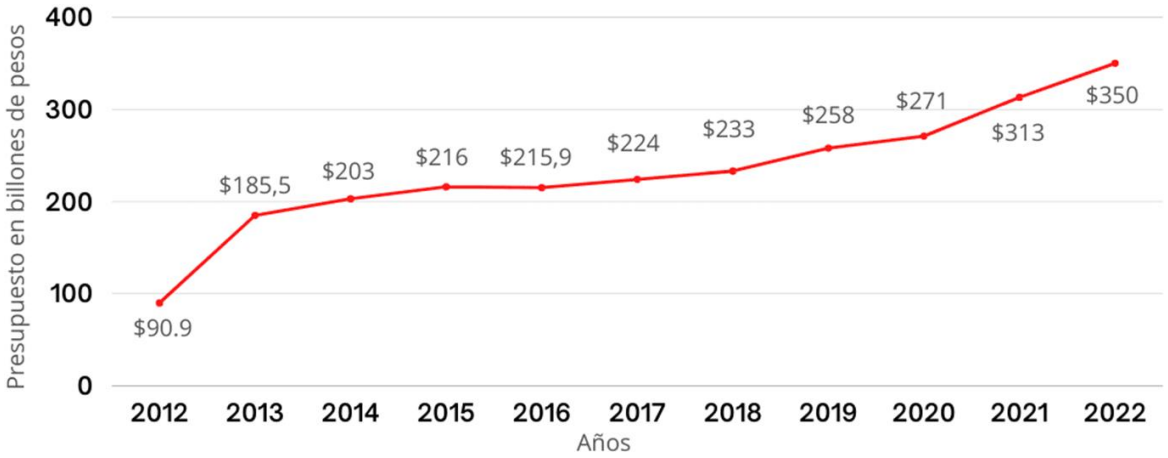
El 25 de octubre de 2013 el presidente de Colombia Juan Manuel Santos, acompañado del secretario general de la OCDE, Ángel Gurria, formaliza el protocolo del ingreso formal de Colombia a la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico- OCDE

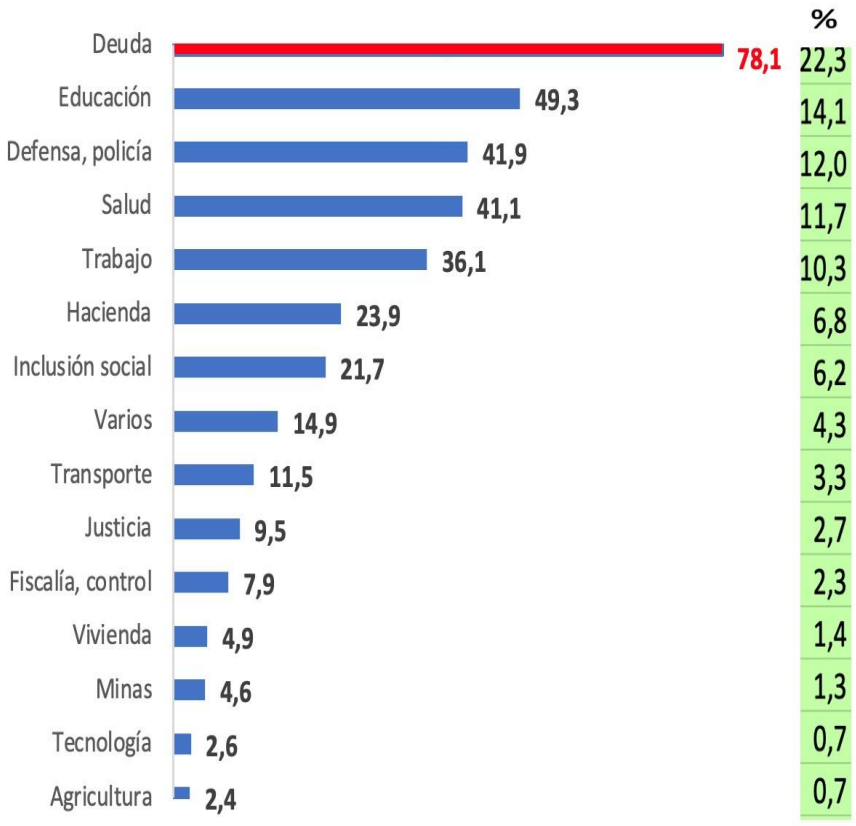
El 29 de octubre del 2013 la Ministra de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Luz Helena Sarmiento, presenta en París (Francia) el Estudio de Desempeño Ambiental de las Políticas de Colombia, realizado con el Comité de Política Ambiental – EPOC de la organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico – OCDE.



El camino a cero, libro del presidente Duque sobre el medio ambiente, Colombia se ha propuesto reducir en 51 % sus emisiones de Gases de efecto invernadero (GEI) para el 2030 y alcanzar la carbono neutralidad en el 2050. De la misma manera, nos hemos comprometido con cero deforestación para el 2030 y lograr que, para ese mismo año, si no antes, dejar el 30 % de nuestro territorio en áreas protegidas.

Evolución del Presupuesto General de la Nación de los últimos 10 años



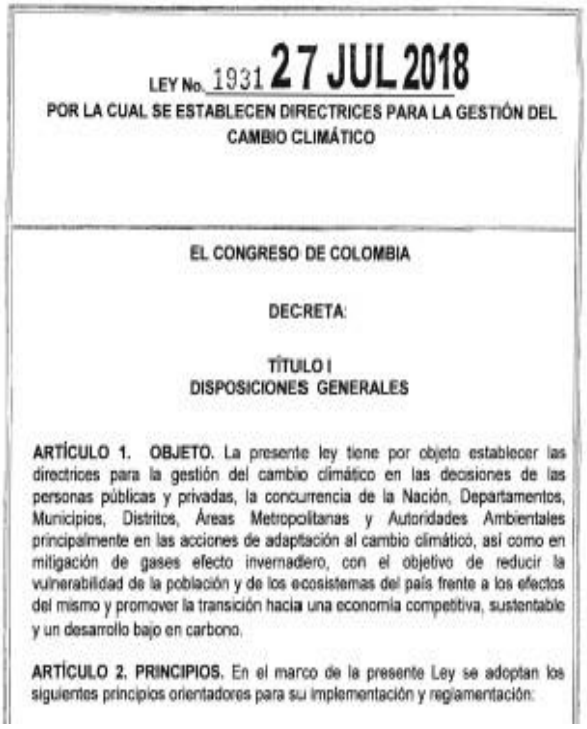


Legislación

Los 7 problemas del medio ambiente más graves:

1. Los bosques desaparecen por la deforestación.
2. La sequía y la escasez de agua.
3. Consumo excesivo y abusivo de los seres humanos.
4. Contaminación del aire que respiras.
5. El cambio climático.
6. Contaminación del mar.
7. Peligro de extinción de especies, destrucción de la biodiversidad

- **Decreto 2278 de 1953.** Se dictan medidas sobre cuestiones forestales.
- **Ley 2 de 1959**. Se dictan normas sobre economía forestal de la Nación y conservación de recursos naturales renovables.
- **Ley 26 de 1977.** Por la cual se crea el Fondo Financiero Forestal.
- **Decreto 1608 de 1978.** Por el cual se reglamenta el Código Nacional de los Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente y la Ley 23 de 1973 en materia de fauna silvestre.
- **Decreto 1681 de 1978**. Por el cual se reglamenta el Decreto ley 2811 de 1974 en lo relacionado con los recursos hidrobiológicos
- **Ley 30 de 1990.** Por medio de la cual se aprueba el Convenio de Viena para la Protección de la Capa de Ozono.
- **Ley 29 de 1992.** Por medio de la cual se aprueba el «Protocolo de Montreal relativo a las sustancias agotadoras de la capa de ozono», suscrito en Montreal el 16 de septiembre de 1987.
- **Ley 99 de 1993.** Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones.



LEY No. 1931 27 JUL 2018

POR LA CUAL SE ESTABLECEN DIRECTRICES PARA LA GESTIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO

EL CONGRESO DE COLOMBIA

DECRETA:

TÍTULO I
DISPOSICIONES GENERALES

ARTÍCULO 1. OBJETO. La presente ley tiene por objeto establecer las directrices para la gestión del cambio climático en las decisiones de las personas públicas y privadas, la concurrencia de la Nación, Departamentos, Municipios, Distritos, Áreas Metropolitanas y Autoridades Ambientales principalmente en las acciones de adaptación al cambio climático, así como en mitigación de gases efecto invernadero, con el objetivo de reducir la vulnerabilidad de la población y de los ecosistemas del país frente a los efectos del mismo y promover la transición hacia una economía competitiva, sustentable y un desarrollo bajo en carbono.

ARTÍCULO 2. PRINCIPIOS. En el marco de la presente Ley se adoptan los siguientes principios orientadores para su implementación y reglamentación:

LEY 1931

1. **Autogestión.** Las personas naturales o jurídicas, públicas o privadas, desarrollarán acciones propias para contribuir a la gestión del cambio climático con arreglo a lo dispuesto en esta Ley y en armonía con las acciones desplegadas por las entidades públicas.

2. **Coordinación:** La Nación y las entidades territoriales ejercerán sus competencias en el marco de los principios de coordinación, concurrencia y subsidiariedad.

3. **Corresponsabilidad:** Todas las personas naturales o jurídicas, públicas, privadas, tienen la responsabilidad de participar en la gestión del cambio climático según lo establecido en la presente Ley.

4. **Costo-beneficio:** Se priorizará la implementación de opciones de adaptación al cambio climático que traigan el mayor beneficio en términos de reducción de impactos para la población al menor costo o esfuerzo invertido, y con mayores cobeneficios sociales, económicos o ambientales generados.

5. **Costo-efectividad:** Se priorizará la implementación de opciones de mitigación de emisiones de gases efecto invernadero con menores costos por tonelada de gases efecto invernadero reducida, evitada o capturada y mayor potencial de reducción o captura, y con mayores cobeneficios sociales, económicos o ambientales generados.

Conclusiones

1. Presupuestos insuficientes para realizar acciones concretas en pro del Medio Ambiente.
2. Falta de educación y cultura ambiental.
3. En la actualidad hay evidencias de una importante problemática ambiental de carácter planetario. Algunos de estos problemas se agrupan bajo la expresión **"cambio global"**, en el que se incluyen: el cambio climático, el calentamiento global, el agujero de ozono, la destrucción del bosque tropical húmedo, el efecto invernadero, la disminución de la biodiversidad, la conservación de los océanos, la desertificación, etc.

ACODAL
ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
65° CONGRESO INTERNACIONAL
Agua, Saneamiento, Ambiente y Energías Renovables
Bogotá - Colombia
Centro de Convenciones Ágora
Julio 13, 14 y 15 de 2022

EVENTOS DE INUNDACIÓN, REMOCIÓN EN MASA E INCENDIOS DE COBERTURA VEGETAL OCURRIDOS EN BOGOTÁ, DISTRITO CAPITAL Y SU RELACIÓN CON LAS CONDICIONES FÍSICO-GEOGRÁFICAS Y CLIMÁTICAS DEL TERRITORIO

[1]Víctor Leonardo López Jiménez*, [2]Lina Marcela Guzmán Mosquera,

[1]Meteorólogo, Msc. Saneamiento y Desarrollo Ambiental. Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia, vlopez@unisalle.edu.co
[2]Ingeniera Ambiental y Sanitaria, Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático – IDIGER-CC, Bogotá, Colombia, lmguzman@idiger.gov.co

Resumen

El presente documento tiene como objeto (en conformidad con los lineamientos consignados en la Ley 1523 de 2012, presentar los resultados del análisis de los eventos de origen natural, de orden hidrometeorológico ocurridos en Bogotá D.C en el periodo comprendido entre 1916 y 2016 y su relación con las condiciones físico-geográficas y climatológicas características de Bogotá.

En el análisis fueron utilizadas teorías descriptivas y probabilísticas, que permitieron estudiar la distribución espacio-temporal de los eventos y su relación con los aspectos físicos y climatológicos que caracterizan a Bogotá. La línea de tiempo que se obtuvo permitió una clara visión sobre los eventos de inundación, movimientos en masa e incendios forestales ocurridos en el Distrito Capital en los 100 años considerados para el estudio. Como resultado del análisis se pudo concluir que el impacto derivado de la ocurrencia de estos eventos está directamente relacionado con la configuración física del territorio, el régimen hidrometeorológico y, más aún, con el desarrollo y crecimiento urbano de la ciudad.

Palabras clave: Distrito Capital**,** Factores de Riesgo, Gestión del Riesgo, Desastres, Condiciones Hidrometeorológicas.

Abstract

The purpose of this document is (in accordance with the guidelines set forth in Law 1523 of 2012) to present the results of the statistical analysis of the events of natural origin that occurred in Bogotá DC in the period between 1916 and 2016 and their relationship with the conditions physical-geographical and climatological characteristics of Bogotá.

Descriptive and probabilistic theories were used in the analysis, which allowed us to study the spatio-temporal distribution of events and their relationship with the physical and climatological aspects that characterize Bogotá. The time line that was obtained allowed a clear vision of the flood events, mass movements, forest fires and earthquakes that occurred in the Capital District in the 100 years considered for the study. As a result of the analysis, it was possible to conclude that the occurrence of these events is directly related to the physical configuration of the territory, its hydrometeorological conditions, and even more, to the urban development and growth of the city.

Keywords: Capital District, Risk Management, Risk Factors, Hydrometeorological Conditions.

INTRODUCCIÓN

La Ciudad de Bogotá D.C., debido a sus condiciones físico-geográficas, hidrográficas y climatológicas, puede considerarse especialmente susceptible a la ocurrencia de eventos de origen natural (hidrometeorológico), como la remoción en masa, inundaciones, tormentas eléctricas e incendios forestales; estas condiciones,

sumadas la ubicación de algunos sectores de la población en zonas de alto riesgo, la hacen una ciudad con una alta probabilidad de ocurrencia de emergencias y/o desastres.

En este contexto, cobra importancia el análisis cronológico de la información relacionada con los eventos potencialmente catastróficos ocurridos Bogotá y su distribución espacio-temporal, teniendo en cuenta la relación con las condiciones y/o factores inherentes al territorio. A través del estudio se quiso establecer, además, el cambio en el comportamiento de los eventos de origen natural ocurridos entre 1916 y 2016, teniendo en cuenta que Bogotá pasó de tener un entorno colonial en 1810, a convertirse en una ciudad capital en el año de 1910 hasta llegar a ser hoy en día una ciudad cosmopolita en constante expansión, el mayor centro financiero, político y cultural de Colombia.

Para consolidar la información se contó con la base de datos del Sistema de Información sobre Desastres, Hidrometeorológica y Medio Ambiente – SIDHMA, de la Universidad de La Salle; la Hemeroteca de Emergencias de Bogotá y el Sistema de Información para la Gestión del Riesgo y el Cambio Climático-SIRE, del IDIGER y la base de datos de la UNGRD

CONDICIONES FÍSICO-GEOGRÁFICAS DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ

Ubicación

Bogotá, Capital de la República de Colombia, se encuentra situada en el centro geográfico del territorio nacional a 2.600 metros sobre el nivel del mar, en el borde oriental de la Sabana de Bogotá, siendo esta la altiplanicie más alta de los Andes colombianos. (Socialhizo, 2016).

Desde inicios del siglo XX la extensión y área de la ciudad ha cambiado considerablemente. En 1916 tenía un área total de 23 km2 y una extensión

aproximada de sur a norte de 9,21 km, y de oriente a occidente 3,3 km; en la actualidad tiene un área total de 1776 km² y un área urbana de 307 km², con una extensión aproximada de 33 kilómetros de sur a norte y 16 kilómetros de oriente a occidente con coordenadas: Latitud Norte: 4° 35'56'' y Longitud Oeste de Greenwich: 74°04'51''.

El Distrito Capital se encuentra limitado al norte con el municipio de Chía, al oriente con los cerros orientales y los municipios de la Calera, Choachí y Ubaque, por el sur colinda con los departamentos del Meta y Huila, ya al occidente se encuentra delineado por el Río que lleva su nombre y los municipios de Cabrera, Venecia, San Bernardo, Arbeláez, Pasca, Sibaté, Soacha, Mosquera, Funza y Cota.

Hidrografía

El Río Bogotá es el cuerpo hídrico con mayor caudal de la sabana; tenía en los inicios del periodo de estudio (1916-2016) como municipios ribereños a Suba, Bosa, Engativá y Fontibón, los cuales fueron anexados como localidades a la ciudad desde 1954. El río San Francisco que para principios del siglo XX era considerado el más caudaloso de la ciudad; parte del tramo entre el cerro de Monserrate de donde baja el caudal y la Avenida Jiménez es conducido hoy por un canal abierto conocido como el “eje ambiental” y el cauce restante se encuentra bajo las vías de la ciudad hasta desembocar al rio Bogotá. La misma suerte corrió el rio San Agustín el cual, bajando del cerro Guadalupe colocaba límite entre sur y norte a la antigua Santa Fe de Bogotá. Los ríos Tunjuelo y Fucha cruzan la ciudad de oriente a occidente en la zona sur y han sido canalizados en algunos sectores debido al crecimiento urbanístico de Bogotá.

Otra de las cuencas importantes es la del Río Salitre o Juan Amarillo cuyo cauce principal cambia de nombre según su trayecto (Rio Arzobispo, El Salitre o

Juan Amarillo). La cuenca del Salitre está conformada por los ríos Negro y Córdoba, junto a las quebradas: Los Rosales, La Vieja, Las Delicias, La Chorrera, Cataluña, Morací, Chicó, Callejas, Molinos y Los Cerros.

Por último, la cuenca del canal Torca tiene un área de drenaje 6.008,69 hectáreas y su eje principal cuenta con una longitud de 13.06 km. Este río nace en los cerros orientales y desemboca al sistema humedal Torca-Guaymaral a altura de la Autopista Norte, y a su vez drena al norte de la cuenca media del río Bogotá.

Clima

A causa de su elevación, Bogotá tiene un clima frío de montaña, con una temperatura promedio de 14°C. Las temporadas secas y húmedas están distribuidas de acuerdo con el tránsito de la Zona de Convergencia Intertropical, dando como resultado un comportamiento bimodal de las lluvias sobre la ciudad. La regularidad del comportamiento de estas condiciones se ve afectada por la variabilidad climática relacionada con El Niño y La Niña.

La precipitación es de tipo bimodal con excepción de la franja de la media y alta montaña de la cordillera oriental, donde se ubica el embalse del Sisga y donde la distribución de las lluvias se considera monomodal (Figura 1).

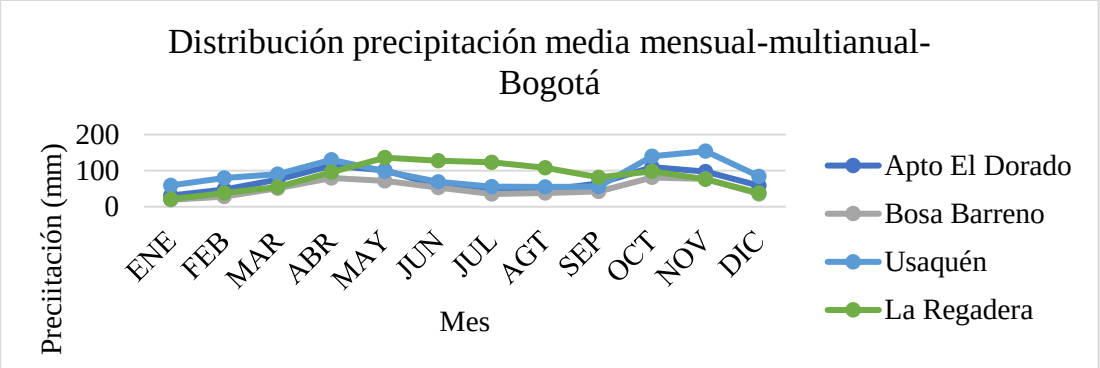


Figura 1. Distribución mensual multianual de la precipitación en Bogotá
Fuente: adaptado del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales

Los fenómenos de variabilidad climática en Bogotá.

La variabilidad climática a escala interanual, presenta alteraciones en el comportamiento del tiempo atmosférico, asociadas a dos fenómenos recurrentes de El Niño y La Niña. Las fluctuaciones climáticas generadas por estos fenómenos, que se resumen con el término "ciclo ENOS" inducen alteraciones temporales de las condiciones climatológicas de diferentes regiones, las cuales generan impactos de diversa índole. (IDEAM, 2018)

Según un informe publicado por el IDEAM (2014) el Fenómeno de El Niño en la capital se manifiesta con el aumento de hasta 0,5 °C en la temperatura máxima media y el 60 % de ausencia de las lluvias en algunos sectores de la ciudad; estos cambios drásticos en el clima llevan a la ocurrencia de incendios forestales y erosión, especialmente al oriente de la capital. De acuerdo con el informe, durante este fenómeno la primera temporada lluviosa del año, es prácticamente normal, mientras que, en la segunda se observan algunos núcleos deficitarios dispuestos en forma dispersa En la segunda temporada seca del primer año de ocurrencia del fenómeno, los déficits de agua son normalmente generalizados.

En la fase Niña se incrementan las precipitaciones en el territorio, debido al enfriamiento superficial del océano pacífico; según un informe realizado por el IDEAM, este fenómeno “se expresa por una disminución de la temperatura media de hasta 0.5ºC y aumento de lluvias que llega a ser de más del 60% en algunos lugares” lo que incide en la salud pública de la población capitalina y contribuye al desencadenamiento de emergencias que llegan a ocasionar catástrofes por inundaciones, encharcamientos y movimientos en masa, además de la proliferación de epidemias.

División Política - Mirada Histórica de la ciudad de Bogotá.

Hasta el año 1954 la ciudad de Bogotá solo estaba compuesta por las zonas que hoy representan 14 localidades y no contaba con todos los barrios que existen en la actualidad; Ciudad Bolívar y Kennedy, por ejemplo, solo contaban con algunos asentamientos. Por medio del Decreto 3640 del año 1954 “Por el cual se organiza el Distrito Especial de Bogotá” fueron anexados seis municipios circunvecinos a la ciudad: Fontibón, Bosa, Usme, Suba, Usaquén y Engativá. De otro lado, el crecimiento de la urbanización en la localidad de Kennedy en los años 60 lleva a la expansión de Bogotá en sentido occidental.

Con la Constitución de 1991, el Distrito Especial se convirtió en Distrito Capital. Las zonas se elevaron a localidades, dividiéndose el Distrito administrativamente en 20 localidades, 19 urbanas y una rural (Bosa, Ciudad Bolívar, Usaquén, Fontibón, San Cristóbal, Rafael Uribe, Usme, Barrios Unidos, Puente Aranda, Tunjuelito, Teusaquillo, Chapinero, Antonio Nariño, La Candelaria, Mártires, Kennedy, Suba, Engativá, Santa Fe, y Sumapaz), para ofrecer a los ciudadanos redes de servicios públicos como infraestructura vial, entretenimiento y abastecimiento de productos.

Desarrollo Urbano

En los primeros 50 años del siglo XX el crecimiento urbano se dio especialmente en sentido norte-sur, siguiendo los ejes viales de la Avenida Caracas y la Carrera. 7ª. Para el año 1951, la ciudad se extendía por el nororiente hasta el barrio Country y por el sur oriente hasta El 20 de Julio y La Victoria. Adicionalmente, los desarrollos urbanos hacia el occidente que partían desde el centro de la ciudad se dieron los ejes de la Calle.13 hasta Techo, de la Avenida de las Américas hasta Marsella y de la Av. Chile hasta las Ferias. (Planeación, 2010)

En la Figura 2 se observa la expansión física de Bogotá en la década del 60, donde la ciudad creció más hacia el suroccidente y nororiente, especialmente en las localidades de Teusaquillo, Engativá, Puente Aranda y Fontibón; en tono claro se muestra el poco desarrollo hacia las localidades de Teusaquillo, Puente Aranda y Fontibón, que para la década del 70 se fueron llenando con la consolidación de nuevos barrios; el crecimiento de la ciudad se desborda hacia el sur occidente correspondiente a la construcción de ciudad Kennedy, por el noroccidente con la ciudadela Niza. Para los 80 el nacimiento de nuevas construcciones se presencia en la zona sur de la ciudad enmarcadas en tono rojo en el mapa, que son más visibles en las localidades de Bosa y Kennedy. También es notable que el eje de la Avenida Primero de Mayo y Autopista sur se aprovechó para extender hacia la zona sur de la ciudad y hacia el sur occidente por la Avenida las Américas, adicional se observa un crecimiento en la zona occidente en la localidad de Fontibón. (Planeación, 2010)

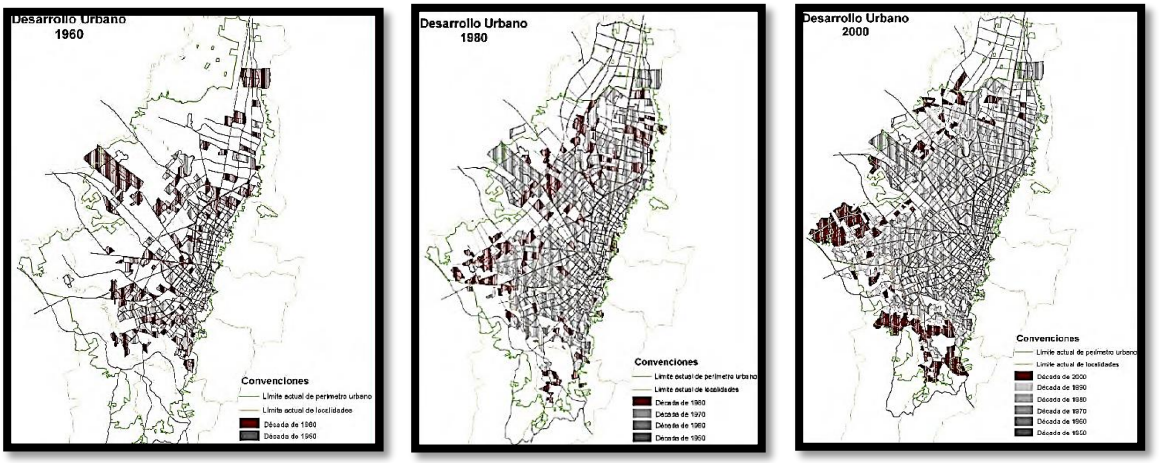


Figura 2. Mapas de crecimiento urbano del distrito capital correspondiente a 1960, 1980 y 2000.
Fuente: adaptado de Planeación Nacional (2010).

Riesgo en la ciudad de Bogotá

De acuerdo con el IDIGER, Bogotá se encuentra expuesta a varios escenarios de riesgo de origen natural y socio-natural, entre los que se tienen: el riesgo por incendios forestales debido a la presencia de gran cantidad de biomasa sobre los cerros orientales que limitan la capital; también está presente el riesgo a inundaciones considerando que “el agua fluye desde los cerros orientales por escorrentía, por quebradas y otros afluentes hasta el río Bogotá; las frecuentes, intensas y periódicas lluvias que caen sobre la ciudad, generan grandes volúmenes de agua, dando origen a inundaciones por desbordamiento.

De otro lado, está el riesgo de movimientos en masa, que recae principalmente sobre las comunidades que habitan las faldas de los cerros orientales. Por último, está el riesgo que representan los sismos (eventos que no hacen parte del estudio). (IDIGER, 2017)

A continuación, se identifican las zonas de Bogotá que, de acuerdo con la información del IDIGER, están en mayor riesgo de sufrir una emergencia o desastre relacionados con los eventos de origen natural o socio-natural considerados en el presente trabajo.

- Inundaciones. Por sus condiciones geográficas y su rica red hídrica, Bogotá tiene un alto grado de amenazas por inundaciones. Las localidades donde se han presentado inundaciones con mayores afectaciones a la población y/o a la infraestructura urbana son: Tunjuelito, Bosa y Kennedy y, por encharcamientos: Tunjuelito, Bosa, Fontibón, Engativá, Barrios Unidos, Usaquén, Usme y Mártires
- Movimientos en masa. El crecimiento urbano de la ciudad de Bogotá ha provocado que un número importante de la población se encuentre

localizada en zonas de ladera. En el Distrito las zonas de ladera en amenaza por movimientos en masa se encuentran en las localidades de Usaquén, Chapinero, San Cristóbal, Usme, Suba, Rafael Uribe Uribe, Ciudad Bolívar y Sumapaz. Se estima que más de 2’500.000 personas se encuentran ubicadas en zonas de amenaza por movimientos en masa, cerca del 20% de la población del Distrito.

- Incendios forestales. La Comisión Distrital para la Prevención y Mitigación de Incendios Forestales (CDPMIF) clasificó los incendios de cobertura en tres categorías: quemas, conato e incendio forestal. En Bogotá existen 122.258 hectáreas de suelo rural que pueden verse afectadas por un incendio de cobertura vegetal. Las localidades más expuestas a este tipo de eventos son: Usaquén, San Cristóbal, La Candelaria, Chapinero, Suba Usme y Sumapaz

EVENTOS DE ORIGEN HIDROMETEOROLÓGICO EN BOGOTÁ

Los 100 años considerados para el análisis de los eventos socio naturales de carácter hidrometeorológico, entre 1916 y 2016, se dividieron en periodos, la mayoría de 20 años, con el fin de observar la evolución de estos eventos con el pasar de las décadas En el caso de las inundaciones y movimientos en masa se tuvo que tomar el primer periodo entre 1916 y 1939 y el último entre 2000 y 2016. En cuanto a los incendios forestales, el primer periodo considerado fue 1947 -1959, debido a que el primer reporte periodístico en las bases de datos tomadas como fuente de información aparece a mediados de 1947

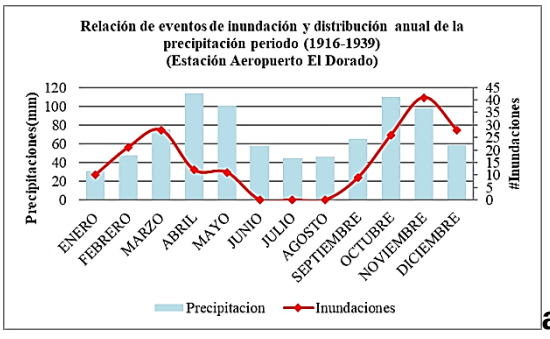
INUNDACIONES

Para el análisis de estos eventos, se tomeron tres estaciones meteorológicas, ubicadas en lugares estratégicos de la ciudad.–La primera estación,

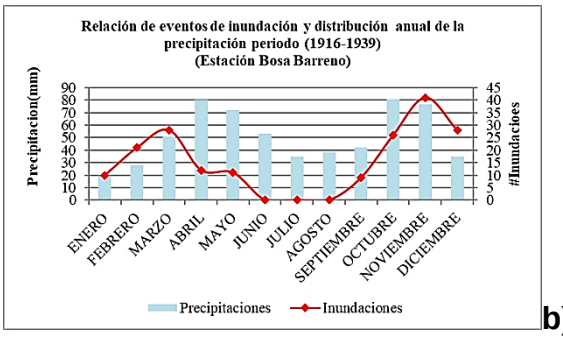
ubicada en el Aeropuerto el Dorado, se encuentra sobre una de las zonas más bajas de la ciudad a 2548 msnm, también caracterizada por ser inundable debido a su cercanía con el río Bogotá, límite natural al occidente de la ciudad. La estación Bosa Barreno se encuentra instalada al sur-occidente en otra zona susceptible a sufrir inundaciones, ya que en este sector convergen el río Tunjuelito y el río Bogotá; este sector tiene, además, deficiencia en la red de alcantarillado. Por último, se tomó la información de la estación Usaquén, situada en la localidad que lleva su nombre.

- **Inundaciones en el periodo 1916 -1939**

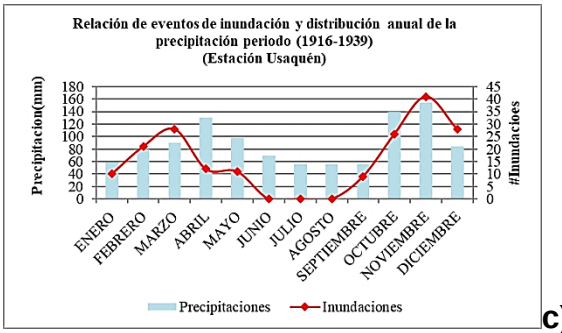
Durante el periodo, el mayor número de eventos de inundación corresponde a las dos épocas lluviosas del año, como se observa en la figura 3 (a, b y c). En la primera época, entre finales de marzo y el mes de mayo, son reportados alrededor de 50 eventos de inundación. Entre finales de septiembre y el mes de noviembre (segunda época de lluvias en el centro del país) se registraron alrededor de 100 eventos durante el periodo.



a)



b)



c)

Figura 3. Relación de eventos de inundación y la distribución mensual multianual de la precipitación en el periodo (1916-1939). a) Estación A. el Dorado b) Estación Bosa Barreno c) Estación Usaquén

Aunque, es evidente que el periodo valle de la curva de eventos de inundación, corresponde a las épocas de pocas precipitaciones en febrero, marzo y las primeras semanas de diciembre, no es extraño el registro de algunas precipitaciones fuertes de origen convectivo (por calentamiento superficial) que condujeran a encharcamientos, sobre todo relacionados con el mal manejo de las aguas lluvias.

Analizado el total anual de eventos de inundación durante el periodo 1916-1939, se evidencia que los años con mayor reporte de inundaciones fueron 1926 con 10 casos, 1928 con 7 casos, 1932 con 7 casos y 1938 con 9 casos, lo que podría corresponder a fenómenos de variabilidad climáticas como La Niña condición que no se puede corroborar ya que el registro más antiguo sobre el ENOS es el entregado por la NOAA en el año 1950.

Distribución espacial. En el periodo 1916 - 1939 el rio San Francisco, considerado como límite entre la zona sur y la norte de la antigua Santa Fe de Bogotá, es mencionado en varios de los reportes como el origen de inundaciones

por desbordamiento. En esta época se hacía especial mención de los sectores hoy conocidos como las localidades San Cristóbal, Santa Fe, La Candelaria, Chapinero y Los Mártires

- **Las inundaciones en el periodo 1940 – 1959**

Al igual que en el periodo anterior, considerando los registros de las estaciones meteorológicas de referencia, el mayor número de casos de eventos de inundación se presenta en los periodos de mayor frecuencia de las lluvias. Como se observa en la Figura 4 (a, b, c), el primer pico de inundaciones en el centro del país, particularmente en la ciudad de Bogotá corresponde al incremento de las lluvias entre finales de marzo y el mes de mayo y, el segundo entre octubre y noviembre.

En la figura se observa que el mayor número de eventos de inundación se presenta hacia el mes de marzo con 29 casos y el segundo con 16 inundaciones ocurridas en el mes de noviembre. En total se presentaron 50 eventos de inundación en el periodo 1940-1959.

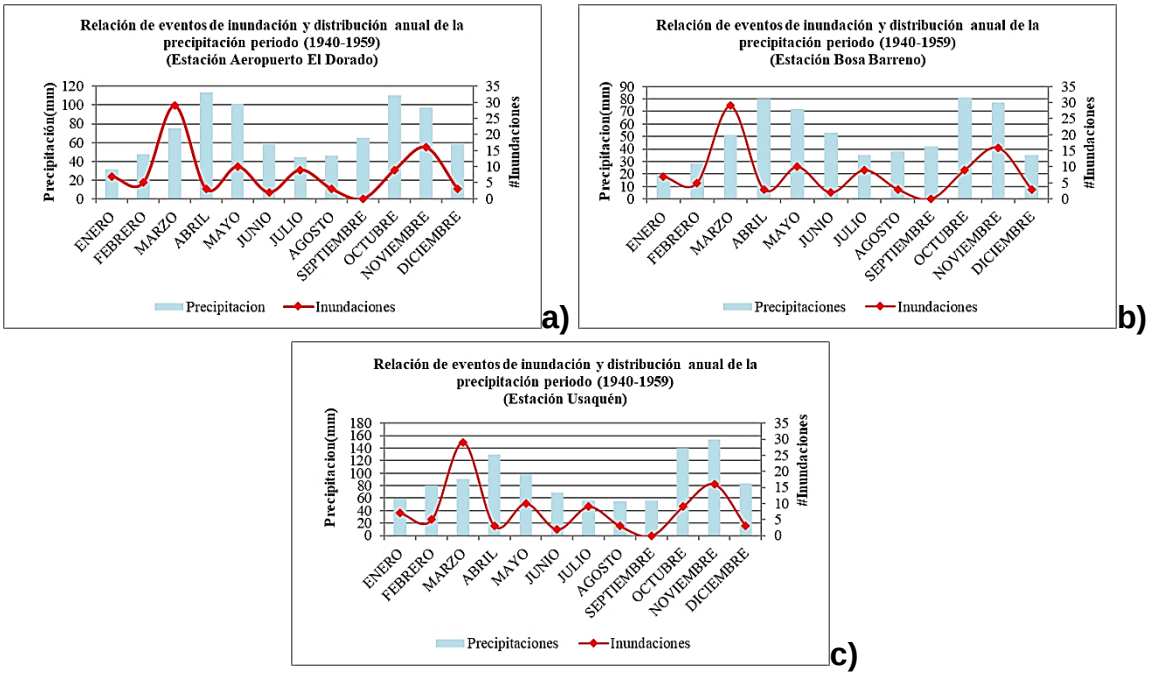


Figura 4. Relación de eventos de inundación y la distribución mensual multianual de la precipitación en el periodo (1940-1959).

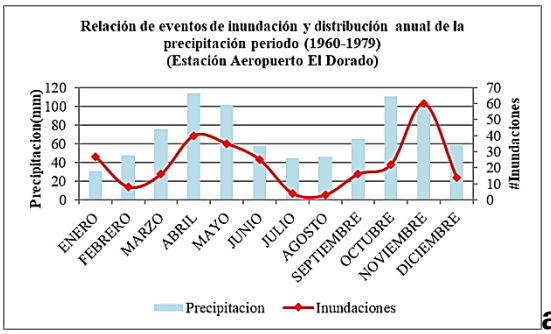
Los meses de abril y mayo, tuvieron menos reportes de inundaciones de lo esperado, debido, talvez a la ocurrencia de largos periodos de sequía, los cuales podrían tener relación con el fenómeno El Niño (reportado por primera vez por la NOAA en 1950). De otro lado, los eventos Niña aparecen reportados entre junio de 1954 y en octubre de 1957, los cuales explican el incremento de las lluvias en el periodo y, así mismo, del total de inundaciones.

Distribución espacial. Las localidades donde se reportaron el mayor número de inundaciones en el periodo fueron Barrios Unidos y Santa Fe, con 14 y 19 eventos respectivamente; también hubo reportes de inundaciones en Bosa, Engativá, Fontibón y Suba, localidades que a partir de 1954 fueron anexadas a la

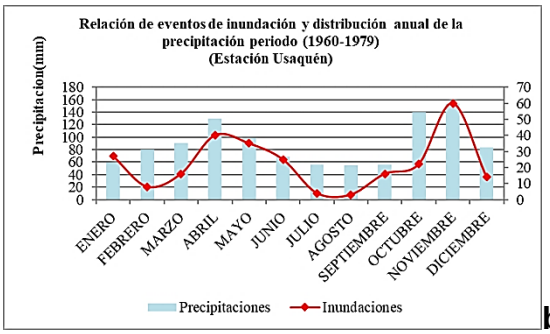
ciudad, dando crecimiento a la capital hacia el sector occidental, donde están las cuencas del Río Bogotá y el Río Salitre, las que se convierten en una amenaza de inundación por desbordamiento en zonas ribereñas.

- **Las inundaciones en el periodo 1960 – 1979**

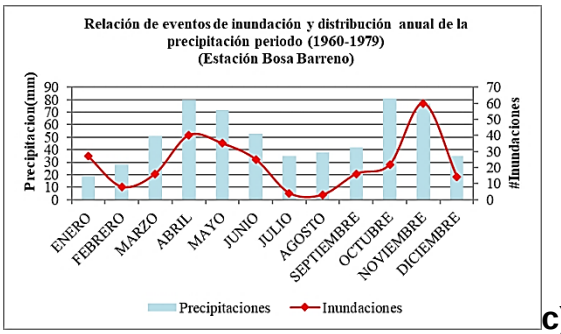
Debido al incremento de información disponible en las bases de datos, sobre las emergencias y desastres en la ciudad, se logró hacer un mejor análisis sobre la relación entre los eventos de inundación y la distribución de las lluvias en la ciudad. En la Figura 5 (a, b, c), se compara la ocurrencia de los eventos durante el periodo, con el comportamiento de las precipitaciones registradas en las estaciones meteorológicas que se tomaron como referencia.



a)



b)



c)

Figura 5. Relación de eventos de inundación y la distribución mensual multianual de la precipitación en el periodo (1960-1979).

El aumento de las inundaciones en el periodo es debido al crecimiento urbano de Bogotá, que para esta época se desbordaba hacia el occidente, sobre terrenos bajos que sufrían encharcamiento por la deficiencia en las redes de conducción del agua lluvia y el desbordamiento de ríos Fucha, Tunjuelo y Bogotá. En total se presentaron 97 inundaciones en el periodo, un incremento del 65% respecto a los ocurridos en el periodo 1940-1959.

Distribución espacial. Las localidades de Santa Fe y Barrios Unidos se vieron afectadas por un alto número de inundaciones (32 y 29, respectivamente), muchas de ellas producto del encharcamiento. Localidades como Teusaquillo y Chapinero también presentaron eventos por razones similares. En localidades como Tunjuelito y Ciudad Bolívar se dio un aumento de las inundaciones y, de acuerdo con la información obtenida de la Secretaria Distrital de Planeación, una de las principales razones de este aumento tiene relación con el crecimiento urbanístico, el cual se dio de forma neurálgica sobre la autopista sur, donde se empezaron a formar nuevos barrios como Venecia, Madelena, Muzú, y Fátima, los cuales por su ubicación y débil sistema de drenaje se vieron expuestos a inundaciones.

- **Inundaciones en el periodo 1980 y 1999.**

Las inundaciones para este periodo se ajustaron a las dos temporadas lluviosas del año, continuando con la tendencia de los periodos descritos anteriormente. En la Figura 6 (a, b, c), se compara la ocurrencia de los eventos de inundación del periodo de estudio, con el comportamiento de las precipitaciones registradas.

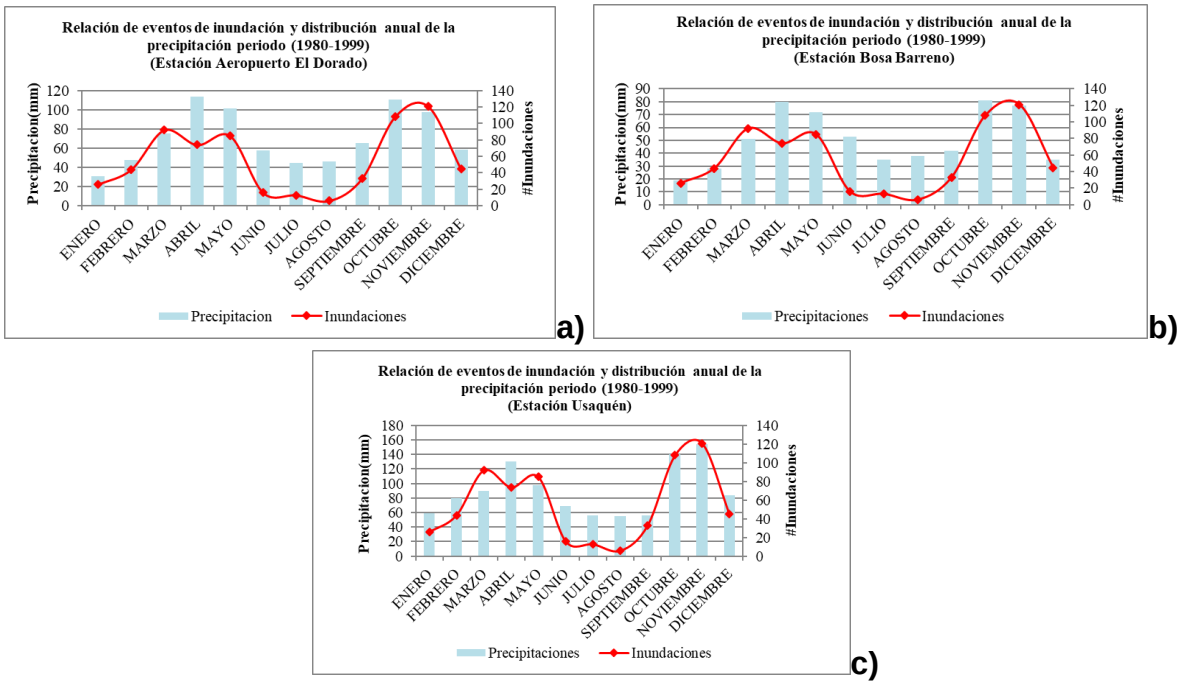


Figura 6. Relación de eventos de inundación y la distribución mensual multianual de la precipitación en el periodo (1980-1999)

En total se reportaron 180 inundaciones a lo largo del periodo 1980/99, lo que representa un aumento **del 60% con** respecto al anterior periodo. Este aumento tiene relación con el continuo crecimiento de, la urbanización en las localidades de Fontibón y Kennedy.

Distribución espacial. Es notorio el incremento de eventos de inundación en las localidades de Usaquén, Suba y Bosa, relacionado con el aumento de asentamientos en sectores con mala infraestructura de vías, mal drenaje de las aguas lluvias y una deficiente red de alcantarillado. En las localidades de Engativá, Fontibón y Kennedy, nacen nuevos barrios entre los que se encuentran San José de Fontibón, Puerta Tejada, Santa Helenita y Villa luz por lo que aumentan los registros de inundación en algo más del 25%, con respecto al periodo anterior.

- **Inundaciones ocurridas en el periodo 2000 y 2016**

En la Figura 7 (a, b, c) se compara el comportamiento de las precipitaciones registradas en las estaciones meteorológicas de referencia con los datos disponibles de los eventos de inundación reportados en el periodo de estudio (2000-2016).

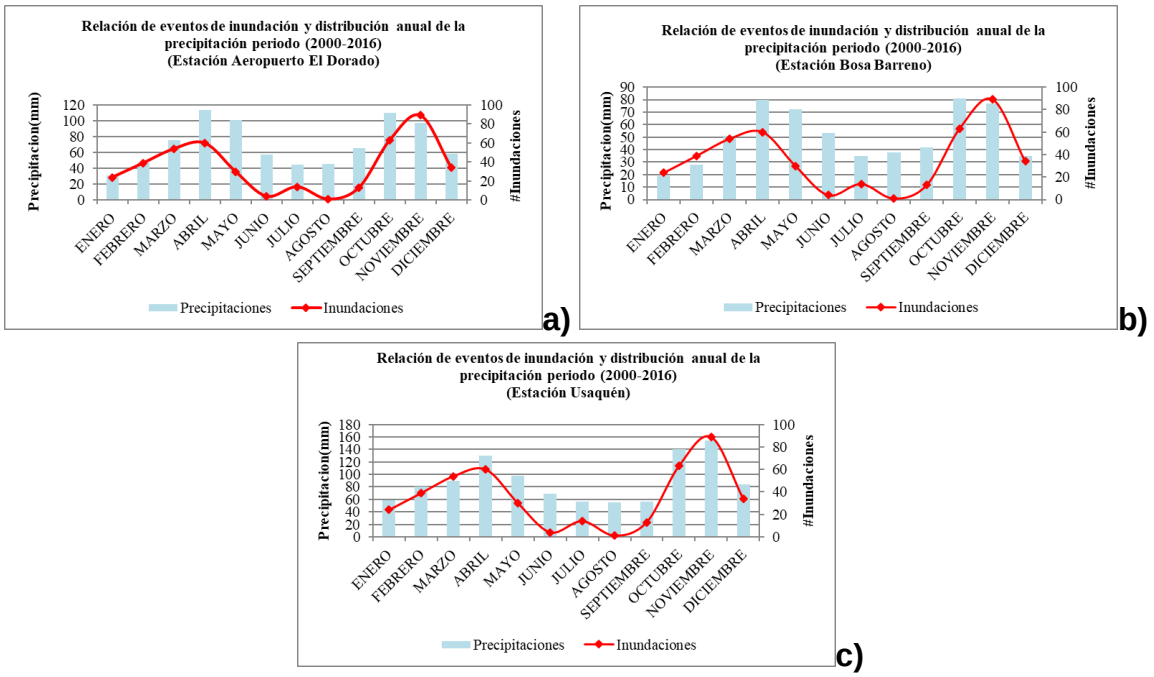


Figura 7. Relación de eventos de inundación y la distribución mensual multianual de la precipitación en el periodo (2000-2016).

Muchas de las inundaciones reportadas en el periodo se atribuyen al encharcamiento, relacionado, no solo con el crecimiento de la ciudad y la densidad poblacional, sino con la poca capacidad mostrada por la infraestructura de los alcantarillados.

Distribución espacial. Las localidades con mayor número de inundaciones fueron Suba y Usaquén, resultado que se puede atribuir a la formación de nuevos barrios hacia el norte de la calle 170, durante la primera década del siglo XXI. Las inundaciones reportadas en Usaquén (70) tienen como origen, la escorrentía producto de las altas y frecuentes precipitaciones que normalmente se presentan sobre los cerros orientales. Las localidades de Chapinero con 42 casos, Suba (52), Fontibón (33) y Engativá (40) continúan reportando encharcamientos por el notorio deterioro de la red de conducción de aguas lluvias

MOVIMIENTOS DE REMOCIÓN EN MASA

Para el análisis de los eventos de movimientos en masa, se tomó la información de cuatro estaciones meteorológicas ubicadas al oriente de la ciudad, que tiene como límite natural los cerros orientales. En sentido sur-norte, la primera estación es La Regadera, ubicada a una elevación de 3008 msnm en la cuenca media del Río Tunjuelo; la segunda es Vitelma ubicada en la zona sur-oriental, en la localidad de San Cristóbal; la tercera es la estación situada en la localidad de Usaquén en el nororiente de la Ciudad; por último, la estación Torca que se encuentra en el límite norte del Distrito en la cuenca del Río Torca.

- **Movimientos en masa en el periodo 1916 - 1939**

En la Figura 8, se compara la ocurrencia de los eventos de movimientos en masa del periodo de 1916-1939, con el comportamiento de las precipitaciones registradas en las estaciones meteorológicas seleccionadas.

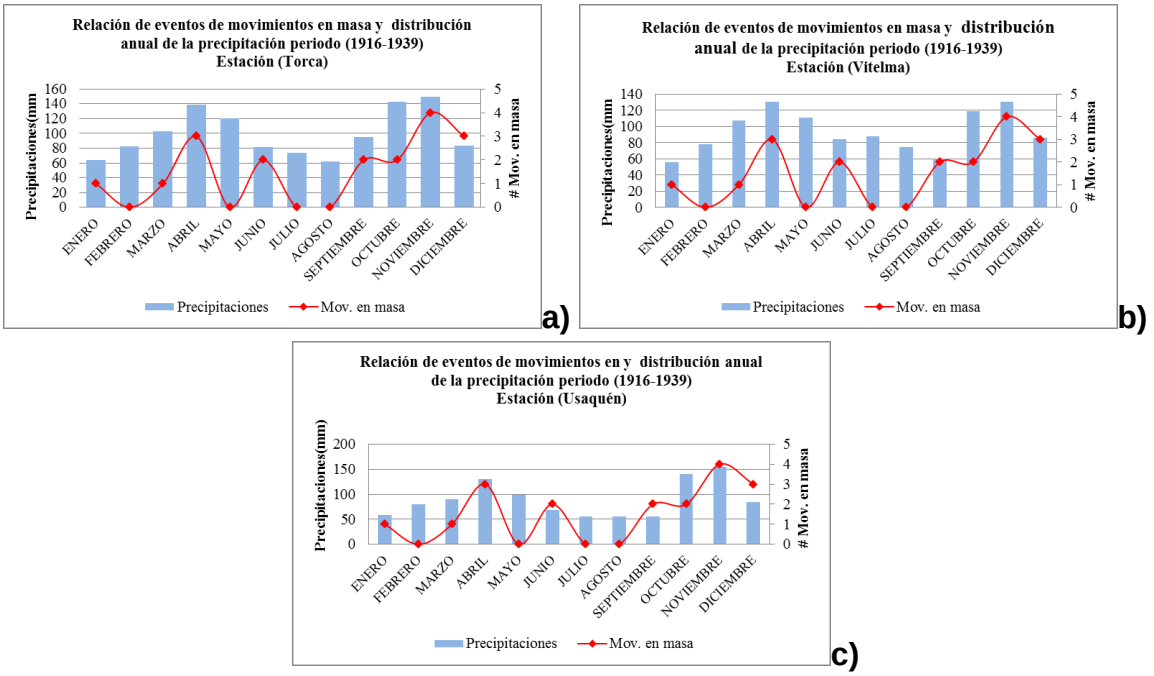


Figura 8. Relación de los movimientos en masa y comportamiento de la precipitación mensual-multianual, periodo (1916-1939). a) Estación Torca b) Estación Vitelma c) Estación Usaquén.

Relacionando la ocurrencia de los movimientos en masa con el comportamiento de las precipitaciones es claro que el aumento o disminución de número de casos reportados es acorde con la distribución bimodal de las lluvias en la ciudad y con su tendencia a la monomodalidad en la parte media y alta de la montaña.

En el primer periodo, el número de casos crece en abril y en el segundo periodo entre octubre y noviembre. Los casos ocurridos en el mes de junio tienen relación con el ingreso de masa húmedas provenientes del sureste del país. La ocurrencia de situaciones de emergencia por deslizamiento para este periodo (24 años) es de 18 eventos, pareciera no ser muy significativa; lo que muestran estas

cifras es que para este periodo específico los cerros orientales no estaban tan poblados y tenían una mayor capacidad de infiltración.

Distribución espacial. En el periodo, la mayor cantidad de eventos de remoción en masa fueron registrados en Chapinero y Santa Fe (7 cada uno). Los reportes sobre los impactos de estos eventos en Chapinero se deben a que, en esta época, esta localidad no sólo estaba ocupada por haciendas, sino también por canteras de extracción de materiales para la construcción, junto a las viviendas de los obreros.

- **Movimientos en masa en el periodo 1940 – 1959**

Considerando que los eventos de movimientos en masa ocurren con mayor frecuencia en la media montaña de los cerros orientales, en la Figura 9, se compara la ocurrencia de estos eventos con el comportamiento de las precipitaciones registradas en las estaciones meteorológicas de referencia.

Se parte del hecho que la información sobre este tipo de eventos no era muy difundida en los diarios de la capital. En el periodo solo se encuentran 6 casos registrados en las bases de datos, 4 de ellos ocurridos entre mayo y julio se observa que este.

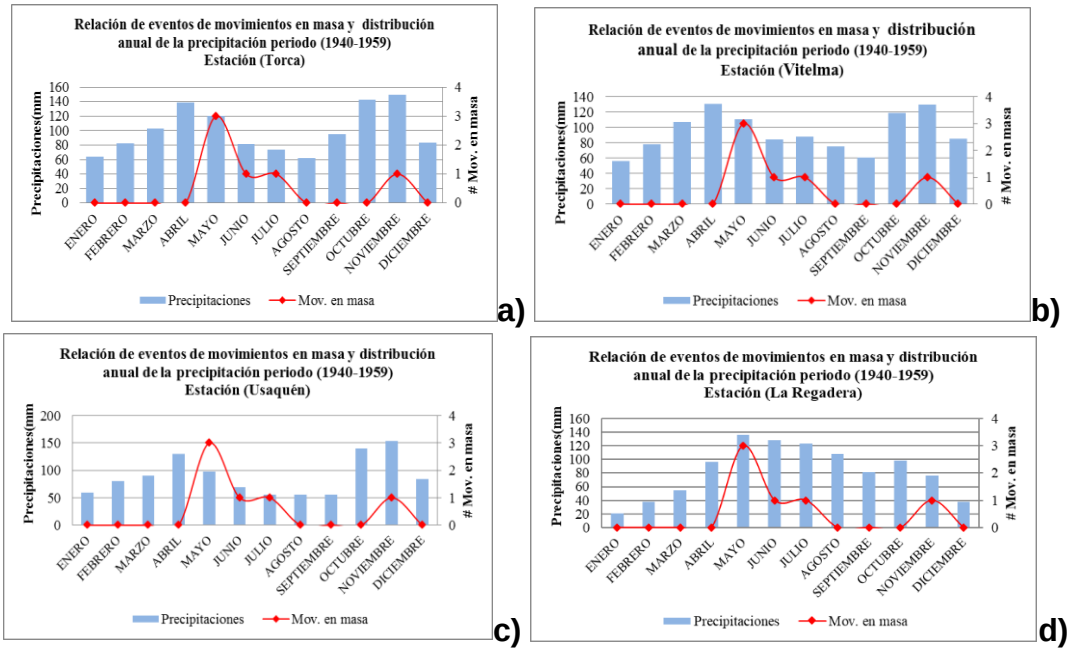


Figura 9. Relación de movimientos en masa y la distribución mensual multianual de la precipitación en el periodo (1940-1959). a) Estación Torca b) Estación Vitelma c) Estación Usaquén y d) Estación La Regadera

La ocurrencia de los eventos de remoción en masa sigue manteniendo la misma relación directa con el comportamiento bimodal de la precipitación, sin desconocer que, entre mediados de junio y el mes de agosto el número de días con lluvia (lloviznas mayormente) se incrementa sobre los cerros orientales, producto del ingreso de masas de aire húmedo provenientes del sureste del país.

Distribución espacial. En el periodo, la mayor cantidad de eventos de remoción en masa fueron registrados en Chapinero y Santa Fe, 7 y 8 respectivamente. Los reportes sobre los impactos de estos eventos en Chapinero se deben a que, en esta época, esta localidad no sólo estaba ocupada por haciendas, sino también por canteras de extracción de materiales para la construcción, junto a las viviendas de los obreros.

Movimientos en masa en el periodo 1960 - 1979

En la Figura 10 se muestra la relación que existe entre los eventos de deslizamiento y el comportamiento de las lluvias para el periodo 1960-1979. Durante este periodo fueron reportados 11 eventos de remoción en masa, algunos de ellos como resultado de los excesos de lluvia a finales de noviembre y comienzos de diciembre.

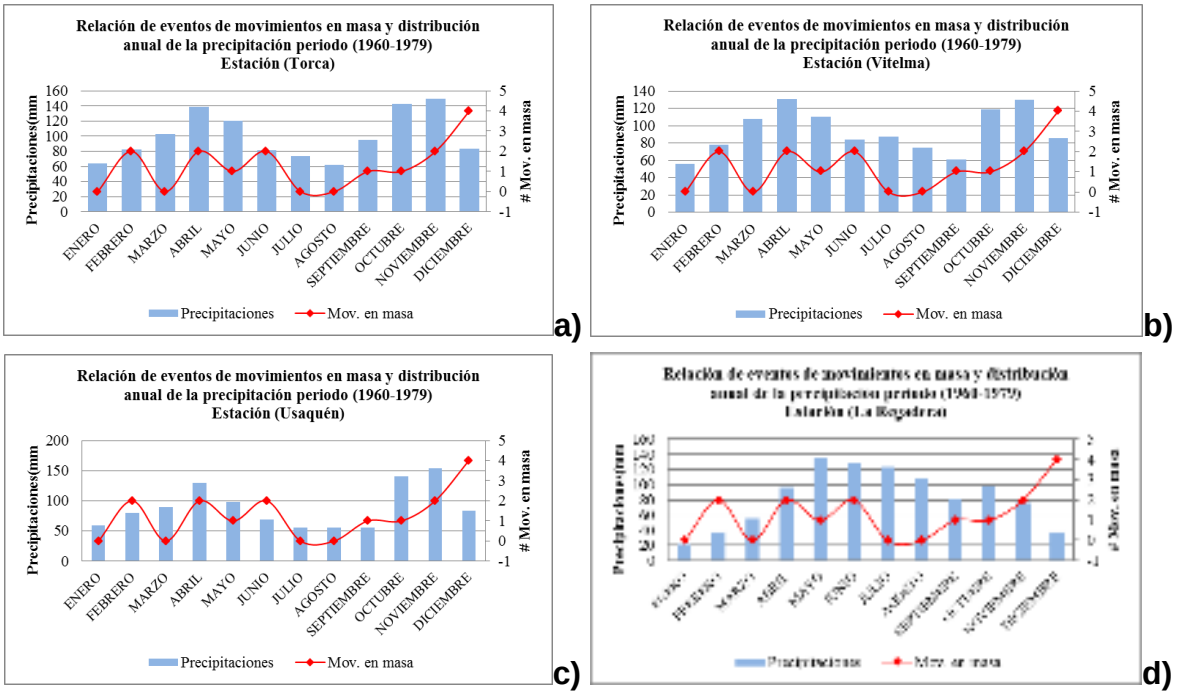


Figura 10. Relación de los movimientos en masa y comportamiento de la precipitación mensual-multianual periodo (1960-1979). a) Estación Torca b) Estación Vitelma c) Estación Usaquén y d) Estación La Regadera

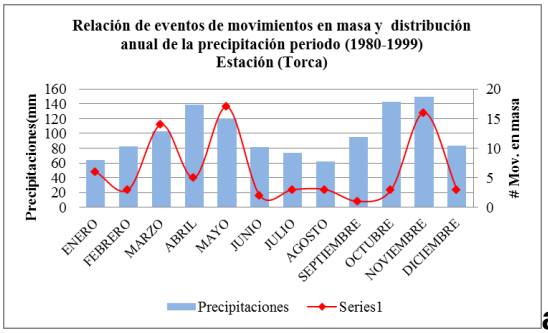
Distribución espacial. Las localidades que reportan eventos (Santa Fe, Chapinero, Usaquén), son justamente aquellas que tienen territorio sobre los cerros orientales. La localidad de Santafé aparece con un mayor número de eventos reportados (3), entre los que se encuentra el que se dio progresivamente en el Bario

Girardot en el año 1945, que se llevó a su paso 18 casas y dejo casi un centenar de personas sin hogar.

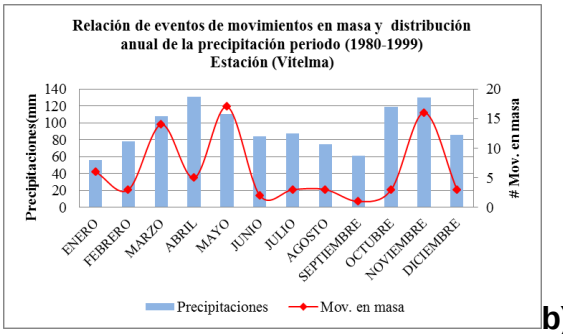
- **Movimientos en masa en el periodo 1980-1999**

En la Figura 11, se compara la ocurrencia de los eventos de movimientos en masa del periodo de estudio (1980-1999), con el comportamiento de las precipitaciones registradas en las estaciones meteorológicas Torca, Vitelma, La Regadera y Usaquén.

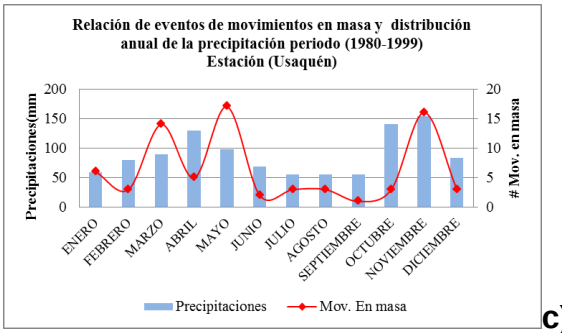
La ocurrencia de los eventos de remoción en masa es acorde a la distribución de las precipitaciones en las estaciones meteorológicas tomadas como referencia. Los eventos que se presentan entre junio y agosto en los barrios del oriente de la capital obedecen a las lluvias relacionadas con el ingreso de masas húmedas y frías provenientes del Brasil, las cuales son mucho más frecuentes en inmediaciones de Usme.



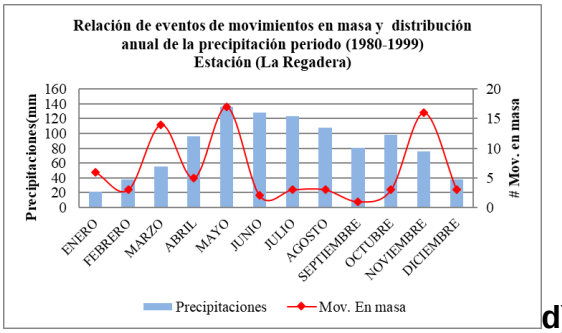
a)



b)



c)



d)

Figura 11. Relación de los movimientos en masa y comportamiento de la precipitación mensual-multianual, periodo (1980-1999). a) Estación Torca b) Estación Vitelma c) Estación Usaquén y d) La Regadera

Distribución espacial. Las localidades de San Cristóbal y Usaquén superaron en el periodo los 20 eventos, seguidas por Ciudad Bolívar con 10 deslizamientos. Según los reportes de los diarios, muchos de los casos ocurrieron en barrios en estado de ilegalidad. En este periodo aparecen registros de deslizamientos en la localidad de Suba, zona que tiene su propia configuración montañosa y cuenta con asentamientos altamente vulnerables.

- **Movimientos en masa en el periodo 2000-2016**

En la Figura 12, se compara la ocurrencia de los eventos de movimientos en masa del periodo 2000-2016, y las precipitaciones registradas en las estaciones meteorológicas de referencia, Al igual que en las décadas anteriores, la distribución mensual-multianual de la precipitación se ajusta al número de eventos de remoción en masa reportados en la capital.

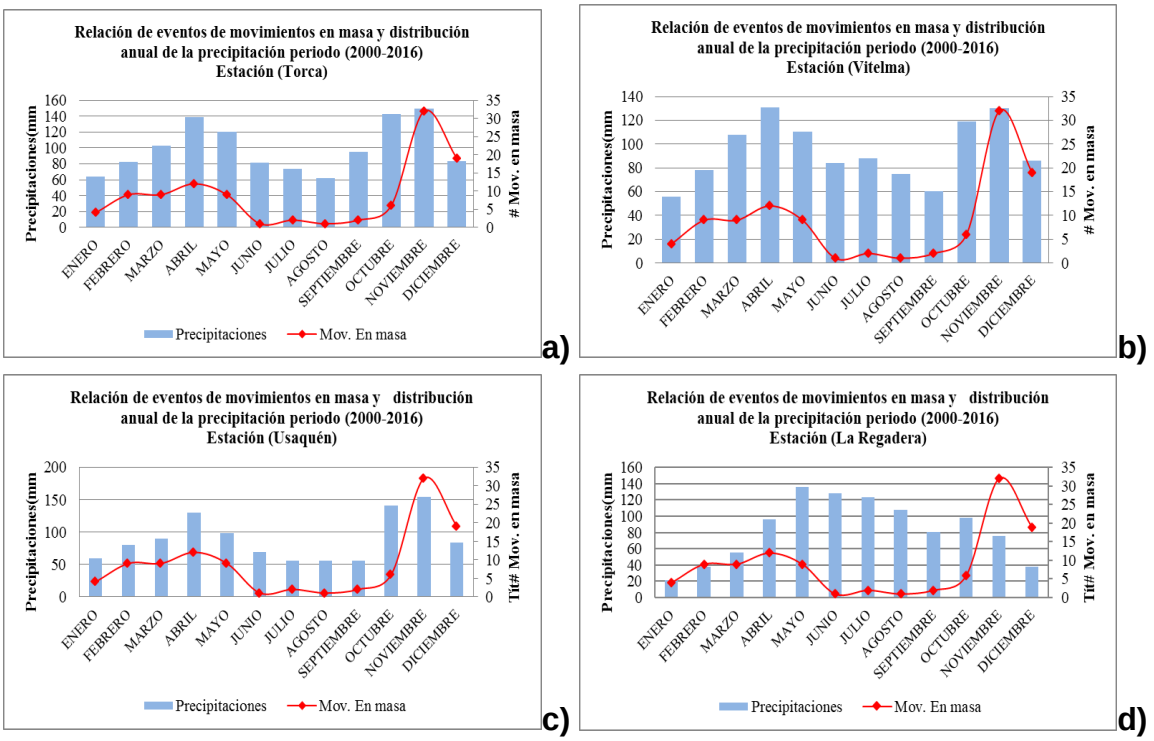


Figura 12. Relación de los movimientos en masa y comportamiento de la precipitación mensual-multianual, periodo (2000-2016). a) Estación Torca b) Estación Vitelma c) Estación Usaquén y d) Estación La Regadera.

El total de eventos de remoción en el periodo fue de 106; la gran mayoría en sectores del piedemonte de la cordillera oriental, en la parte alta de las localidades de Chapinero, San Cristóbal, Santafé, Usaquén y Ciudad Bolívar.

Distribución espacial. Para este periodo de 17 años, el que nos trae a la Bogotá de hoy, con la configuración territorial que conocemos, no es de extrañar que la localidad que presenta el mayor número de movimientos en masa es Ciudad Bolívar (28 casos), doblando en número de registros a San Cristóbal y Usaquén (14 y 15, respectivamente), que en el periodo anterior la superaban ampliamente, esto debido a las obras de mitigación adelantadas en estas últimas por el Distrito en

cabeza del IDIGER y al avance en la legalización de predios que eran de invasión, lo que condujo a la mejora de las redes de servicios públicos y alcantarillado. El aumento de los casos en Ciudad Bolívar se debe al aumento de asentamientos irregulares, altamente vulnerables y con un gran impacto sobre esta zona montañosa de la Ciudad

INCENDIOS DE COBERTURA VEGETAL

De acuerdo con el SIRE (Sistema de Información de Gestión de Riesgos y Cambio Climático) del IDIGER, los incendios de la cobertura vegetal en Colombia son recurrentes durante los periodos secos anuales y afectan páramos, bosques húmedos andinos y áreas de plantaciones forestales, con causalidades asociadas a las necesidades de expansión urbana, de fronteras agrícolas y deficiencias en la educación ambiental de la población.

Para relacionar las condiciones climáticas con la ocurrencia de incendios forestales en Bogotá se tomó la información de cuatro de las estaciones meteorológicas ubicadas en el sector oriental, sobre los cerros que limitan la capital, franja que por su pendiente y cobertura es considerada propensa a registrar este tipo de eventos; la estación Usaquén, ubicada a 2650 msnm; Torca, ubicada, a una elevación de 2579 msnm Vitelma, ubicada a 2802 msnm, , y la estación La Regadera, en la localidad de Tunjuelito, a una elevación de 3008msnm.

- **Incendios de cobertura vegetal en el periodo 1940 - 1959.**

A diferencia de los otros eventos, el primer periodo de incendios forestales se tomó entre 1940 y 1959, teniendo en cuenta que fue en 1947 cuando fue registrado el primer evento en las fuentes consultadas. Los incendios forestales están dados por la relación entre las condiciones climáticas y los factores antrópicos

lo que les da el carácter de evento de origen socio-natural. En la Figura 13 (a, b, c y d) es posible observar la relación entre el número de reportes de incendios de cobertura y los meses en los que las lluvias son escasas (enero a marzo y julio a septiembre), tiempo en el que hay menor nubosidad, una mayor radiación, menor humedad en el aire y el incremento de la temperatura superficial.

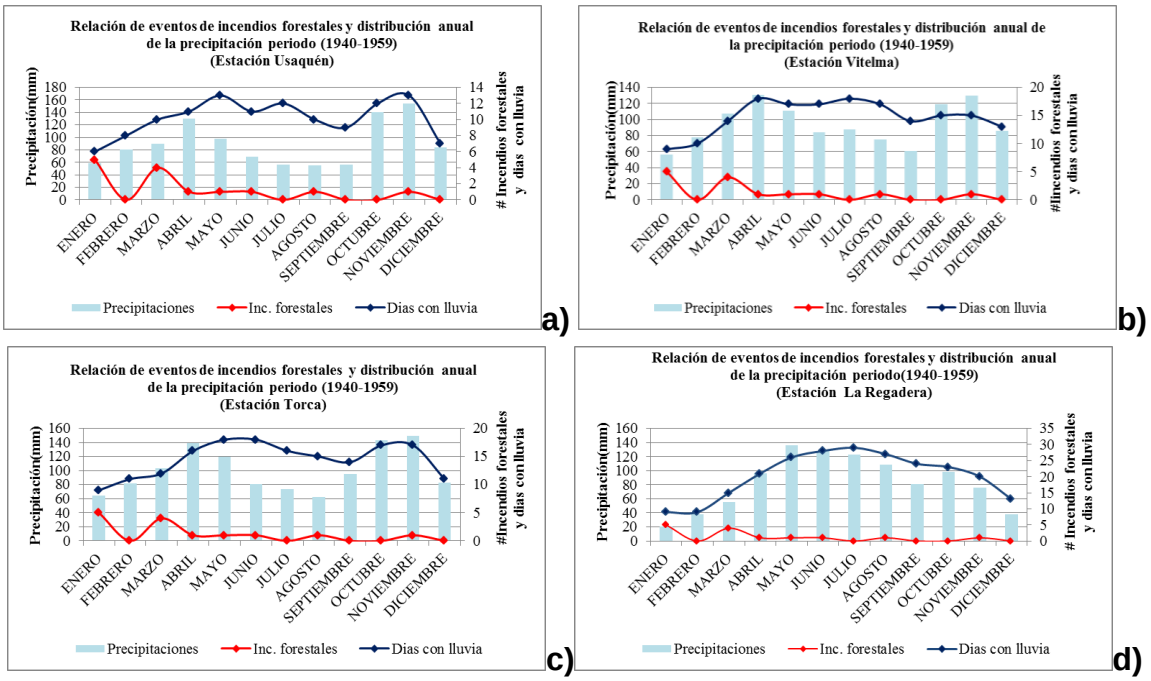


Figura 13. *Relación de los incendios forestales y comportamiento de la precipitación mensual-multianual, periodo (1940-1959). a) Estación Usaquén b) Estación Vitelma c) Estación Torca d) Estación La Regadera.*

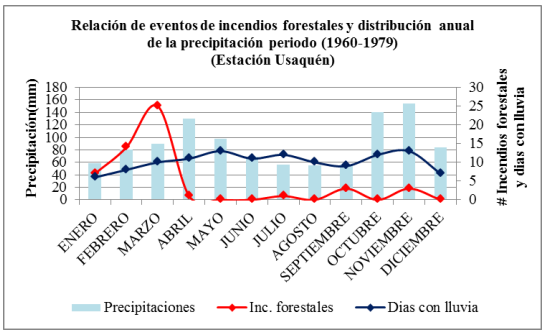
Se esperaría que, en el segundo periodo seco, entre finales de junio y comienzos de septiembre, el número de incendios forestales se incrementara, pero en esta franja de media y alta montaña de la cordillera oriental, aumenta el número de días con lluvia (lloviznas en la mayoría de los casos), debido a las masas de aire

húmedo traídas desde la Amazonia por los vientos alisios del sureste, condiciones alejan la probabilidad de incendios de cobertura.

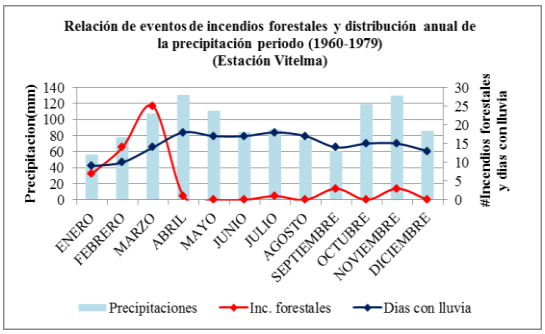
Distribución espacial. Las localidades donde ocurrieron incendios forestales fueron Chapinero y Usaquén (5 casos cada uno) y Santa Fe (3 casos); también se presentaron conatos de incendio en Rafael Uribe que para la época contaba con áreas de pastizales, propensas a experimentar este tipo de eventos.

- **Incendios de cobertura vegetal en el periodo 1960 - 1979.**

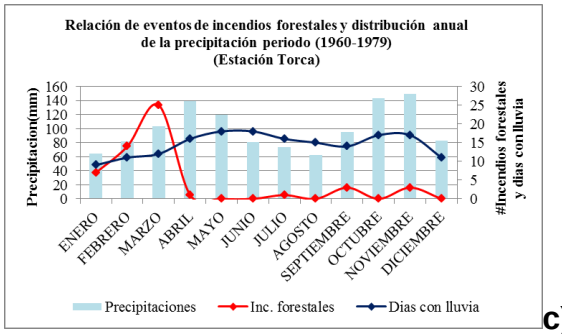
En la Figura 14 (a, b, c, d) se observa la relación entre el número de reportes de incendios y las condiciones climáticas a lo largo del año. En este periodo los incendios forestales tuvieron un aumento significativo en los meses de enero, febrero y marzo, tiempo en el que normalmente se presenta la primera época seca del año.



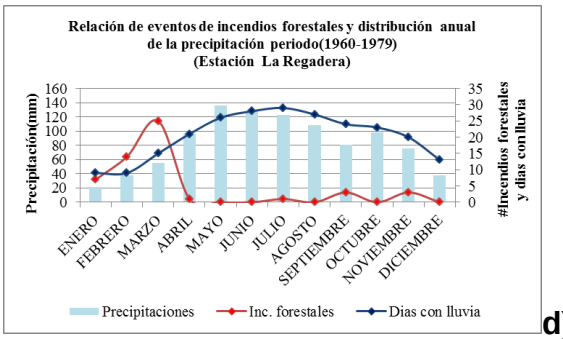
a)



b)



c)



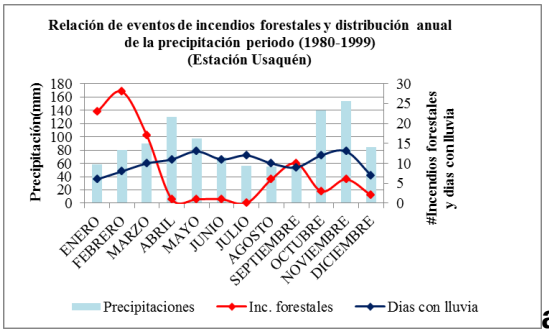
d)

Figura 14. *Relación de los incendios forestales y comportamiento de la precipitación mensual-multianual, periodo (1960-1979). a) Estación Usaquén b) Estación Vitelma c) Estación Torca y d) Estación La Regadera*

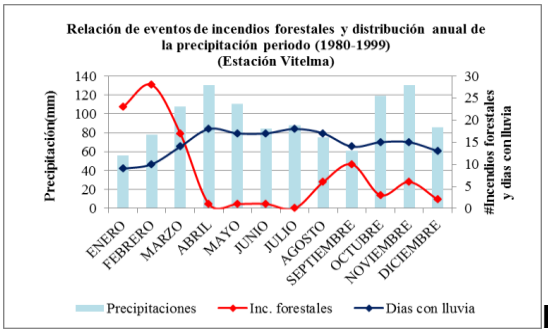
Distribución espacial. Durante el periodo, en la localidad de Santa Fe se registraron 13 incendios forestales, todos en los cerros de Monserrate y Guadalupe. En las localidades de Chapinero y Usaquén también se presentaron incendios impactando sectores de barrios como El Bagazal, Cerros del Castillo, Bosque Calderón, Barracas Oriental y Torca. También figuran reportes sobre algunas quemas en localidades como Kennedy, Teusaquillo, Rafael Uribe, en espacios como parques y lotes baldíos con espeso material arbóreo.

- **Incendios de cobertura vegetal en el periodo 1980 - 1999.**

En la figura 15 (a, b, c, d) se observa el comportamiento de las precipitaciones mensuales-multianuales y días con lluvias: Se observa que en los tres primeros meses del año se presentan la mayoría de los incendios de cobertura debido a las condiciones climáticas ya anotadas anteriormente



a)



b)

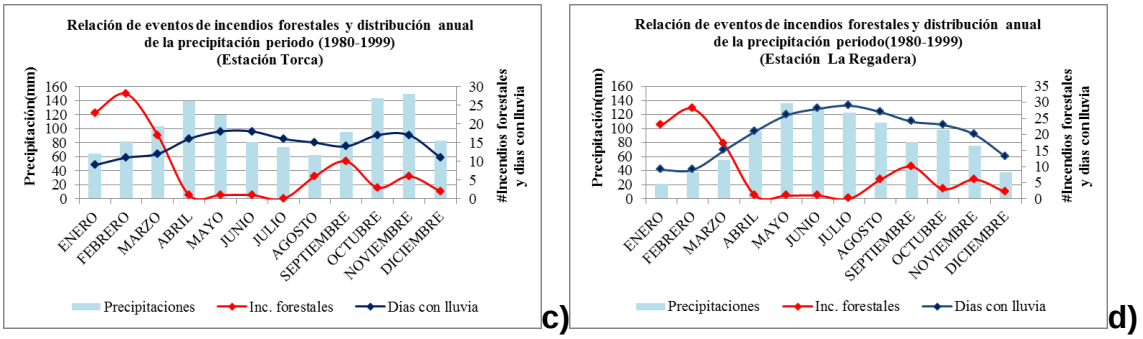


Figura 15. *Relación de los incendios forestales y comportamiento de la precipitación mensual-multianual, periodo (1980-1999). a) Estación Usaquén b) Estación Vitelma c) Estación Torca d) Modelo días de lluvia d) Estación La Regadera*

Distribución espacial. En las localidades donde se presentaron un mayor número de eventos son Chapinero y Usaquén con 15 y 16 eventos, respectivamente, Santa Fe con 25 casos y San Cristóbal con 7. En sectores de los cerros de Monserrate y Guadalupe se registraron incendios que alertaron a la ciudad en materia ambiental por la generación de contaminantes. En Suba también se presentaron conatos de incendio en inmediaciones del humedal La Conejera. En localidades como Usme y Ciudad Bolívar la extensión de los asentamientos aumentó la probabilidad de eventos de incendio debido a factores antrópicos.

- **Incendios de cobertura vegetal ocurridos en el periodo 2000 - 2016**

En la figura 16 (a, b, c, d), se observa la distribución de las precipitaciones anuales y los días con lluvia, correspondientes a los datos registrados en las estaciones meteorológicas de referencia durante el periodo de estudio y su relación con los incendios de cobertura.

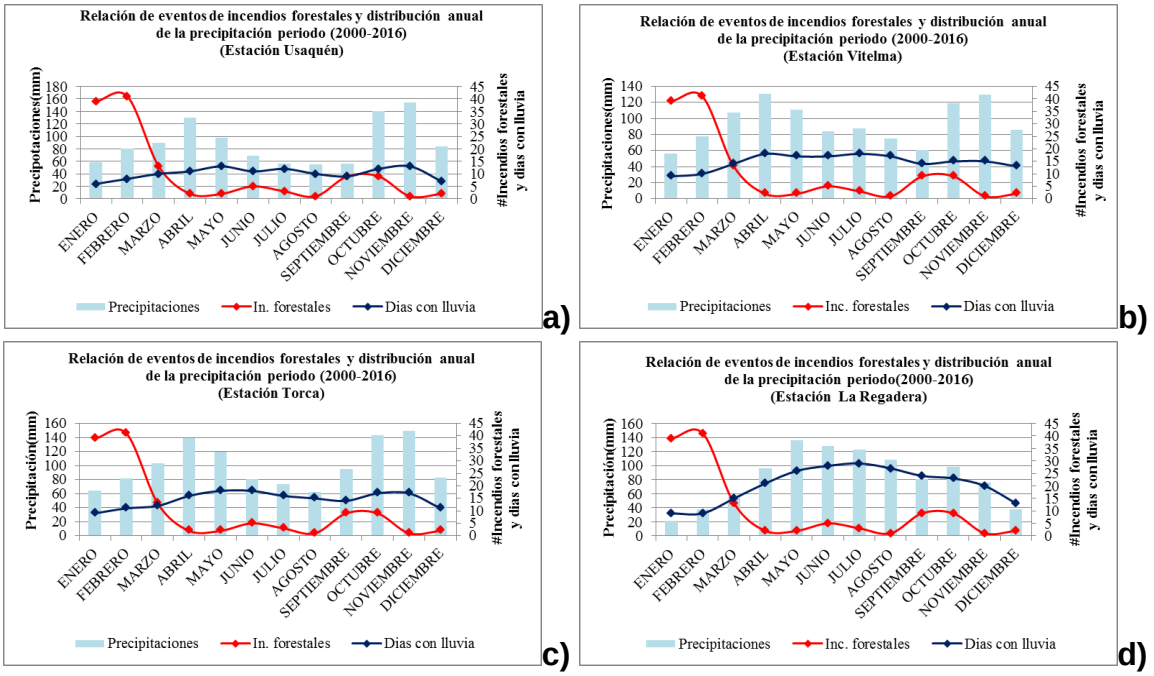


Figura 16. *Relación de los incendios forestales y comportamiento de la precipitación mensual-multianual, periodo (2000-2016). a) Estación Usaquén b) Estación Vitelma c) Estación Torca d) Estación La Regadera*

Se observa que los eventos de incendio forestal durante este periodo tuvieron sus máximos en los tres primeros meses del año (temporada seca), en especial durante enero y febrero; en septiembre y los primeros días de octubre se registraron un número importante de casos debido, como en el periodo anterior, a la reducción en la llegada de aire húmedo sobre la sabana de Bogotá y el debilitamiento de la ZCIT, producto de los eventos El Niño reportados por la NOAA (2002-03, 2004-05, 2009-10 y 2014-16)

Distribución espacial. Las localidades donde se presentaron el mayor número de eventos fueron Chapinero, San Cristóbal, Santa Fe y Usaquén, con (18, 25, 14 y 15 casos, respectivamente). En los cerros de Monserrate y Guadalupe se

registraron varios incendios que alertaron a la ciudad en materia ambiental por la afectación a la calidad del aire.

Es importante anotar que, la influencia que puede llegar a tener el cambio climático en eventos de origen natural como los mencionados en el presente estudio (Inundaciones, movimientos en masa e incendios forestales) se prevé que sea significativa, ya que estos eventos están relacionados directamente con variables del clima como: precipitación, temperatura, días con lluvia, entre otros; que son altamente sensibles a cualquier cambio en las dinámicas atmosféricas.

CONCLUSIONES

En el presente estudio se buscó corroborar que la ocurrencia de eventos de emergencia por inundaciones, movimientos en masa, e incendios forestales, están relacionados de manera directa con las condiciones físico-geográficas y climáticas del territorio, en este caso de Bogotá, durante un siglo (1916-2016), además de hacerse una correlación con los fenómenos de variabilidad climática (El Niño/La Niña) y los registros de dichos eventos, dejando abierta la discusión para futuros estudios relacionados con cambio climático.

A continuación, se enuncian las conclusiones a las que se llegaron de acuerdo con los hallazgos de esta investigación.

- Los sectores con mayor ocurrencia de inundaciones para el periodo 1916-1939 es lo que hoy se conoce como las localidades de La Candelaria y Santafé, donde se encontraba la mayor ocupación del territorio de la Bogotá de la época, surcadas por el Río San Francisco, que se desbordaba con cada lluvia fuerte y sumado a lo característico de sus calles angostas y precario

sistema de alcantarillado, las vías se convertían en ríos avivados por la escorrentía aportante de los cerros y las altas pendientes del terreno que, antes más que ahora, terminaban por inundar y causar daños graves a las viviendas de este sector.

- En el periodo de 1940-1959 aparecen reportes de inundaciones en localidades de Bosa, Engativá, Fontibón y Suba, debido a su crecimiento urbanístico en esta época. Estas localidades antes de 1954 eran municipios independientes de la ciudad y a partir de este año se fueron anexando, lo que dio como resultado un rápido crecimiento de la capital hacia el sector occidental, donde se encuentran las cuencas del Río Bogotá y el Río Salitre, las que se constituyeron en una amenaza de inundación por desbordamiento en las zonas ribereñas.

- En total se presentaron 270 inundaciones en el periodo 1960-1979, lo que representa un incremento del 65% de estos eventos con respecto a los datos estadísticos del periodo 1940-1959. Este aumento en la ocurrencia de las inundaciones está relacionado con el crecimiento urbano de Bogotá en dirección sur y occidente, hacía terrenos bajos susceptibles a sufrir encharcamiento por la deficiencia en las redes de conducción del agua lluvia y los efectos de los desbordamientos de ríos como el Fucha, Tunjuelo y Bogotá

- En el periodo 1980-1999 se presentaron dos periodos del fenómeno de La Niña siendo el de 1988-1989 el de mayor intensidad dejando como resultado casi 60 inundación, tal número eventos es congruente con los meses en los que mayores precipitaciones se presentaron en la ciudad para el año mencionado anteriormente, pues, esta anomalía relacionada con el clima

coincidió con el segundo periodo lluvioso del año, acrecentando su intensidad.

- En el periodo de 2000-2016 se presentó el periodo La niña más fuerte de la historia del país, ocurrido en los años 2010-2011 y que dejo vastas zonas de la Ciudad inundadas por el desbordamiento de varios Ríos, y la precaria condición de los sistemas de alcantarillado.

- Los registros del comportamiento de los fenómenos ENOS se inició en 1950, por lo que para el periodo 1916-1939 no se puede hacer una relación directa de la ocurrencia de eventos de emergencia por movimientos en masa y los periodos El Niño y La Niña.

- Para el periodo 1940-1959 se reportaron 6 movimiento en masa, este número bajo de reportes se puede deber a la ocurrencia de varios eventos El Niño durante este periodo (1951, 1952, 1953, 1954, 1957, 1958, 1959). Por la información disponible en prensa escrita se sabe que, en 1940, 1947 y 1952, se presentaron fuertes veranos que provocaron sequias con racionamiento de agua, y perdida de cultivos, por lo que a pesar de que los registros de los ENOS iniciaron en 1950, por las características se pudiera inferir que 1940 y 1947 pudieron ser periodos El Niño.

- En el periodo 1960-1979, las localidades que mayor registro de ocurrencia de movimientos en masa son Santafé y San Cristóbal, seguidos por Ciudad Bolívar, tres localidades ubicadas en la ladera de los Cerros Orientales. Ciudad Bolívar para esta época nacía como un asentamiento irregular de invasión que fue creciendo de manera rápida y desordenada, con materiales de construcción deficientes y sin consideraciones de amenaza por las condiciones del terreno.

- Para 1980-1999 se observa que aparecen registros de eventos de remoción en masa en Suba, registros que no sorprenden ya que esta localidad tiene su propia configuración montañosa conocida como los Cerros de Suba, con una conformación morfoestructural similar, por no decir que igual, a la de los Cerros Orientales, inestable y con fácil premiación de agua en las témporas de lluvia.

- Llegados al último periodo (2000-2016) en que se dividió el siglo de estudio, se halló que los casos de emergencias por movimientos en masa, fueron mayormente registrados en la localidad de Ciudad Bolívar, lo que se puede deber al aumento de asentamientos irregulares y altamente vulnerables, en esta región montañosa de la Ciudad, resultado que es acorde con las zonas de alto riesgo que son objeto de monitoreo constante, especialmente en las temporadas de lluvia, para mitigar los daños y prevenir pérdidas humanas, por parte del IDIGER.

- En el periodo 1940-1959, se inician los registros de incendios forestales en el Distrito capital, siendo las localidades con mayor ocurrencia Santafé, Chapinero y Usaquén, teniendo en cuenta que la ciudad de Bogotá para el periodo experimento una expansión urbana acelerada hacia los cerros nororientales, debido a que se anexaron a la configuración territorial de la Ciudad pueblos aledaños, y el aumento de la población, no sorprende que la actividad antrópica sobre los cerros fuese una causa de los registros de emergencia por estos eventos.

- Para el periodo comprendido entre 1960 y 1979 aparecen reportes de eventos de incendios en localidades como Kennedy, Teusaquillo, Rafael Uribe que a pesar de no estar inmersas en los cerros orientales contaban

con espacios de cobertura vegetal como parques locales y lotes baldíos con espeso material arbóreo. También se reportaron incendios en la localidad de Suba debido al aumento de las urbanizaciones hacia las formaciones montañosas (cerros de suba) que dieron una condición más susceptible de presentarse incendios forestales por causas antrópicas.

- En el periodo entre 1980 y 1999, ocurrieron incendios forestales en localidades como Kennedy, Fontibón y Engativá donde el comportamiento de las lluvias es diferente en cuanto a la intensidad, es decir los periodos secos no son alterados por el comportamiento de las precipitaciones en los cerros orientales, sumado a la existencia para la época de terrenos con cobertura arbórea como el bosque de Bavaria ubicado en la localidad de Kennedy y el humedal Capellanía en la localidad de Fontibón susceptibles a las fuerzas de las llamas.

- En el periodo entre 2000 y 2016 los incendios forestales registrados fueron alarmantes, resaltando años como 2015 y 2016 donde las condiciones climáticas propiciaron el aumento de los eventos, dejando daños ambientales graves, pues según el Instituto Distrital de Gestión del Riesgo y Cambio Climático (IDIGER) más de 377,88 Hectáreas de bosque se incineraron en estas conflagraciones.

El hallazgo más relevante fue que, la ocurrencia de los eventos de emergencia (inundaciones, movimientos en masa, e incendios forestales) desencadenados por factores naturales, está directamente relacionada con la configuración física del territorio, las condiciones hidrometeorológicas del mismo, y más aún, con la actividad constructiva desmedida y sin planificación concreta que ha ido de la mano

del crecimiento urbano y demográfico en La Ciudad, aumentando la población en situación de vulnerabilidad.

BIBLIOGRAFÍA

Balsam, K. F., Martell, C. R., Jones, K. P. , & Safren, S. A. (2019). Affirmative cognitive behavior therapy with sexual and gender minority people. In G. Y. Iwamasa & P. A. Hays (Eds.), *Cultural y responsive cognitive behavior therapy: Practice and supervision* (2nd ed., pp. 287-314). American Psychological Association. https://doi.org/10.1037/0000119-012

Calisher, C. H., Carroll, D., Colwell, R., Corley, R. B., Daszak, P., Drosten, C., … Turner, M. (2021). Science, not speculation, is essential to determine how SARS-CoV-2 reached humans. *The Lancet, 398*(10296), 209–211. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(21)01419-7

Centers for Disease Control and Prevention. (2018, enero 23). *People at high risk of developing flu-related complications.* https://www.cdc.govlflu/about/disease/high_risk.htm

Cortés R.)2007). Del Urbanismo a la planeación en Bogotá 1900-1990. Esquema inicial y materiales para pensar la trama de un relato. Revista Bitácora, Universidad Nacional. Bogotá. https://www.redalyc.org/pdf/748/74811111.pdf

IDEAM – UNAL. La variabilidad climática y el cambio climático en Colombia. Bogotá. D.C. 2018, http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023778/variabilidad.pdf

Lavrakas, P. (2012). *Encyclopedia of Survey Research Methods.* Sage Publications, Inc. https://doi.org/10.4135/9781412963947

Lòpez V. (2012). Temas de introducción a la meteorología y la climatología. Ediciones Unisalle. Bogotá – Colombia

Miller, G. H., Alley, R. B., Brigham-Grette, J., Fitzpatrick, J. J., Polyak, L., Serreze, M. C., & White, J. W. (2010). Arctic amplification: Can the past constrain the future? *Quaternary Science Reviews*, *29*(15), 1779–1790. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2010.02.008

Nordebo, S., Naeem, M.F. & Tans, P. (2020). Estimating the short-time rate of change in the trend of the Keeling curve. *Scientific Reports, 10*, 21222. https://doi.org/10.1038/s41598-020-77921-2

Wåhlberg, A. E. (2001). The theoretical features of some current approaches to risk perception. *Journal of Risk Research, 4*(3), 237–250. https://doi.org/10.1080/13669870152023791

ACODAL
ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
65° CONGRESO INTERNACIONAL
Agua, Saneamiento, Ambiente y Energías Renovables
Bogotá - Colombia
Centro de Convenciones Ágora
Julio 13, 14 y 15 de 2022

Análisis de los efectos del cambio climático en el abastecimiento hídrico a través de modelación de microcuencas hidrográficas: Un estudio de caso en La Bananera, Risaralda – Colombia.

Diana Marcela Mayo Osorio[1*], Daniel Steeven Vanegas Cáceres[1]

1Grupo de Investigación en Ecología, Ingeniería y Sociedad, Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad Tecnológica de Pereira

*Autor corresponsal: Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad Tecnológica de Pereira, carrera 27 #10-02- Álamos, Pereira, Risaralda. 660003.Colombia. Email: dianamayo_1997@utp.edu.co

Abstract

Climate change is a complex phenomenon that affects society and ecosystems worldwide. In developing countries such as Colombia, people living in the countryside face significant challenges due to their low adaptive capacity to a fast-changing environment. Climate change could affect water availability, becoming one of the most relevant problems by impacting human health, food supply, production of goods, and others. This study aims to analyze the influence of climate change on the future water supply by using a small watershed modeling. For this aim, we implemented the Robust Decision-Making method (RDM), using the software WEAP, to estimate the water budget under several supply-demand scenarios. Input data in the model included household water consumption, water loss, demographic growth, land use, and local climate data between 2016 to 2021. In addition, the modeling process used a period between 2021 and 2040. Preliminary results show that the water supply deficit ranges from 65% coverage in 2021 to 58.2% in 2040 for the extreme scenario. This situation may worsen because of the dynamics of increasing tourism in the area that increases water demand and the deforestation that may affect water quality and supply. Therefore, an integral approach including water loss control and watershed reforestation may prevent the deterioration of water resources.

KeyWords: Climate change, small watershed, modeling, water supply, WEAP

Resumen

El cambio climático es un fenómeno complejo que afecta a la sociedad y los ecosistemas a nivel mundial. En países en desarrollo como Colombia, las personas que viven en el campo enfrentan importantes desafíos debido a su baja capacidad de adaptación a un entorno que cambia rápidamente. El cambio climático podría afectar la disponibilidad de agua, convirtiéndose en uno de los problemas más relevantes al afectar la salud humana, el suministro de alimentos, la producción de bienes y otros. Este estudio tiene como objetivo analizar la influencia del cambio climático en el suministro futuro de agua mediante el uso de modelación de microcuencas. Para ello, implementamos el método de Toma de Decisiones Robustas (RDM), utilizando el software WEAP, para estimar el presupuesto de agua bajo varios escenarios de oferta y demanda. Los datos de entrada en el modelo incluyeron el consumo de agua de los hogares, la pérdida de agua, el crecimiento demográfico, el uso de la tierra y los datos climáticos locales entre 2016 y 2021. Además, el proceso de modelado utilizó un período entre 2021 y 2040. Los resultados preliminares muestran que el déficit de suministro de agua oscila entre el 65 % de cobertura en 2021 y el 58.2 % en 2040 para el escenario extremo. Esta situación puede empeorar por la dinámica en aumento del turismo en la zona, lo que incide en el incremento de la demanda hídrica y la deforestación que puede afectar la calidad y el suministro del agua. Por lo tanto, un enfoque integral que incluya el control de pérdidas de agua y la reforestación de cuencas puede prevenir el deterioro de los recursos hídricos.

Palabras clave: Cambio climático, microcuenca, modelación, suministro de agua, WEAP.

Introducción

El cambio climático y el aumento de su variabilidad se ha convertido en uno de los debates mundiales más importantes en las últimas décadas, en especial por los impactos que genera sobre los ecosistemas, las poblaciones y sus actividades económicas. Algunos de los impactos derivados del cambio climático ponen en riesgo el desarrollo y la calidad de vida ante el deterioro de los medios de subsistencia.

En Colombia, los eventos extremos son potenciados por el fenómeno de variabilidad climática de La Niña y el Niño, y han configurado efectos de extrema sequía para el fenómeno del Niño y periodos de altas precipitaciones para el caso de la Niña (Espinoza, 2010). La alta vulnerabilidad del territorio a los efectos del cambio climático, sumado a las condiciones socioeconómicas de los sectores, principalmente en las zonas rurales del

país, han originado que se presenten riesgos por inundación, movimientos en masa o incluso riesgo ante el desabastecimiento hídrico.

El gobierno colombiano ante este panorama ha construido el Plan de Adaptación al Cambio Climático PNACC en articulación con el Sistema Nacional de Cambio Climático (SISCLIMA), cuyo objetivo es reducir el riesgo y los impactos socioeconómicos asociados a la variabilidad y al cambio climático en Colombia. Estos insumos ayudarán a sectores y territorios a: (1) generar un mayor conocimiento sobre los riesgos potenciales e impactos actuales, dentro de lo que se incluye su valoración económica; (2) aprovechar las oportunidades asociadas al cambio y a la variabilidad climática; (3) incorporar la gestión del riesgo climático en la planificación del desarrollo sectorial y territorial; y (d) identificar, priorizar, implementar, evaluar y hacer seguimiento de medidas de adaptación para disminuir la vulnerabilidad y exposición de los sistemas socio-económicos ante eventos climáticos (Departamento Nacional de Planeación et al., 2014).

Adicionalmente, el gobierno nacional a través del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) ha trabajado con los escenarios de cambio climático, en estos se han estado analizando las variables de precipitación, temperatura y humedad las cuales son importantes porque con estas se presentan los panoramas y comportamientos del cambio climático para todas las regiones y cada uno de los departamentos del país. Estos escenarios se han proyectado hasta el año 2100 y representan una herramienta fundamental para la planificación y toma de decisiones en los territorios (IDEAM et al., 2015).

Acorde con lo antes mencionado, la necesidad que surge desde el nivel nacional de analizar los efectos futuros del cambio climático y el nivel de adaptación sobre los territorios, en especial de las zonas rurales, ha encaminado el desarrollo de esta investigación. En este sentido, el proyecto investigativo tiene por objetivo analizar los efectos del cambio climático en el abastecimiento hídrico a través de la modelación de la microcuenca de la quebrada El Chamizo en la vereda La Bananera en Pereira – Risaralda.

Para el planteamiento metodológico de la investigación se toma como referencia al Método de Toma de Decisiones Robustas (RDM), utilizando Water Evaluation And Planning System (WEAP). Este software es una herramienta de modelación para la planificación y distribución de agua que puede ser aplicada a diferentes escalas, desde pequeñas zonas de captación hasta extensas cuencas (Universidad Catolica de Chile; Stockholm Enviroment Institute, 2009).

WEAP requirió de insumos de oferta y demanda para llevar a cabo la modelación de la unidad de análisis. Los insumos representaron las variables hidroclimatológicas entre 2016 y 2021, usos del suelo, componentes del balance hidrológico (ligados a los usos del suelo), la demanda hídrica de los suscriptores y pérdidas del sistema. Igualmente, para la proyección de datos a futuro se tuvo en cuenta los escenarios de cambio climático, el crecimiento poblacional y comercial esperado para la microcuenca. Además, se consideró las estrategias de gestión ligadas a la disminución de consumo y pérdidas técnicas en el sistema de abastecimiento.

En general, la modelación y simulación de WEAP permite a grandes rasgos definir el estado actual y futuro de la zona de estudio, e intenta convertirse en un apoyo para que los actores locales y regionales planifiquen y tomen decisiones sobre el riesgo por desabastecimiento hídrico ante futuros escenarios de cambios climáticos.

Materiales y métodos

Para el presente proyecto investigativo se desarrolló una adaptación al método de Toma de Decisiones Robustas (RDM), el cual tiene por objetivo identificar opciones o estrategias de adaptación que pueden funcionar bien en una gama más amplia de futuros posibles (INECC, 2020). El método incluye un total de 7 etapas, sin embargo, dados los alcances de la investigación se emplearon tres: la construcción del modelo en Water Evaluation And Planning System (WEAP), el marco XLRM y la visualización de datos.

Construcción del modelo

La modelación de la microcuenca de la quebrada El Chamizo fue llevada a cabo utilizando el software WEAP. Este constituye una herramienta que apoya la planificación de recursos hídricos balanceando la oferta de agua (generada a través de módulos físicos de tipo hidrológico a escala de subcuenca) con la demanda de agua (caracterizada por un sistema de distribución de variabilidad espacial y temporal con diferencias en las prioridades de demanda y oferta) (Universidad Catolica de Chile; Stockholm Enviroment Institute, 2009).

Para la modelación fue necesario esquematizar la unidad de análisis o microcuenca, y posteriormente definir los elementos de la oferta y demanda de agua. Determinar la oferta de agua requiere de insumos como usos del suelo, datos hidroclimatológicos, y los componentes del Método Hidrológico Precipitación-Escorrentía, que son el coeficiente del cultivo (Kc), capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces (Sw), capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda (Dw), factor de resistencia a

la escorrentía (RRF), conductividad de zona de raíces (Ks), conductividad de zona profunda (Kd), y la dirección preferencial de flujo (f).

Los elementos de la oferta como las variables de temperatura, precipitación, y humedad (tabla 1) fueron obtenidos a partir de la interpolación de datos climáticos entre 2016 y 2021. Para ello se emplearon datos de las estaciones La Colonia, Volcanes, San Juan y San José; administradas por la Red Hidroclimatológica de Risaralda. Por su parte, los usos del suelo (figura 1) se obtuvieron a partir de la digitalización de una fotografía aérea suministrada por la Corporación Autónoma Regional de Risaralda. A partir de este proceso desarrollado en Quantum GIS (QGIS), se logró identificar un total de 10 usos del suelo en 73 hectáreas que corresponde al área de la microcuenca. Finalmente, para definir los parámetros del Método Hidrológico (ligado a los usos del suelo) se hizo uso de fuentes secundarias (tabla 2).

Tabla 1. Interpolación de datos hidroclimatológicos

Meses	Precipitación media	Temperatura media	Humedad media
Enero	105.0	18.8	74.9
Febrero	91.9	19.0	79.5
Marzo	165.7	19.4	81.8
Abril	213.6	18.9	86.3
Mayo	165.7	18.6	88.1
Junio	110.5	15.8	86.4
Julio	105.3	17.5	82.6
Agosto	60.8	19.4	73.0
Septiembre	140.5	19.0	79.7
Octubre	196.5	16.8	85.0
Noviembre	182.3	15.3	86.1
Diciembre	181.2	17.1	83.5

Tabla 2. Parámetros de uso del suelo

Usos del suelo	Kc	Sw	Dw	RRF	Ks	Kd	f
Aguacate	0,73	620	800	2	20	80	0,72
Arbustos	1,05	600	800	2	20	80	0,50
Banano	0,98	700	800	2	20	80	0,72
Bosque	1,10	800	800	2	20	80	0,30
Cultivos	0,95	1400	800	2	20	80	0,72

Guadua	1,10	800	800	2	20	80	0,30
Pastos	0,75	500	800	2	20	80	0,65
Suelos desnudos	0,75	300	800	2	20	80	0,70
Vías	0,75	300	800	2	20	80	0,70
Viviendas	0,40	300	800	2	20	80	0,70

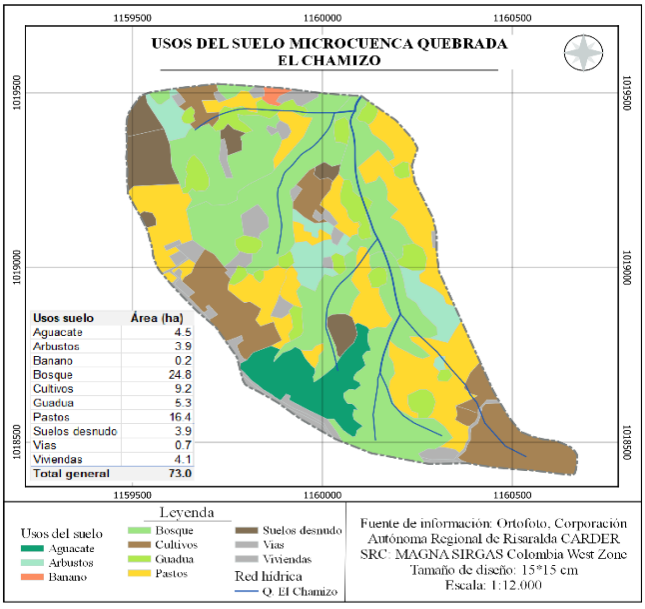


Figura 1 Usos del suelo microcuenca quebrada El Chamizo

Por otro lado, la caracterización de la demanda se logró a partir de la recolección de información de fuentes primarias y secundarias. La caracterización permitió definir el número de suscriptores y el consumo de agua para el sector público, comercial y de viviendas (tabla 3). De otra parte, como elemento adicional a ingresar al modelo se determinó las pérdidas del sistema de abastecimiento, según lo manifiesta la resolución 0925 de la CARDER (2020) el acueducto posee pérdidas del 48%.

Tabla 3. Caracterización de la demanda

Sector	Clasificación	Suscriptores	Demanda m3/año
Sector comercial	Restaurantes y café	8	15314
	Tiendas de víveres	5	1163
	Hotel	1	450
Sector público	Escuela	1	350
	Hogar adulto Mayor	1	4651
Viviendas		62	14419
Total general		78	36348

Marco XLRM

El marco XLRM está constituido por las incertidumbres externas (X), las estrategias de gestión (L), las relaciones (R) y medidas o indicadores (M) (Riascos et al., 2014). De los elementos antes mencionados se hizo énfasis en las variables X y L. Las incertidumbres (X) a introducir en la modelación en WEAP representan los factores que están fuera del control de los actores en el proceso de toma de decisiones, pero que tienen un potencial para influir en los resultados (Instituto del Ambiente de Estocolmo, 2015). La definición de la incertidumbre se basó en fuentes secundarías para los escenarios de cambio climático y el crecimiento poblacional y comercial (tabla 4). Por otra parte, las estrategias de gestión (L) representan acciones específicas disponibles para mejorar las condiciones o resultados frente a un futuro incierto (Instituto del Ambiente de Estocolmo, 2015). Estas se basaron en la disminución de los consumos que se espera cada año por parte de los actores presentes en la microcuenca. Además, para la disminución de las pérdidas técnicas del sistema de abastecimiento se tomó en cuenta el valor máximo permitido en Colombia, que es de 30% y un valor fijado por el investigador (tabla 5).

Tanto para las incertidumbres como las estrategias de gestión se subdividieron en escenarios tendencial y extremo. El escenario tendencial corresponde a las variables hidroclimatológicas que se esperan para esa zona del país, así como las medidas futuras que puedan tomar los actores principales de la microcuenca de la quebrada El Chamizo. Por otra parte, el escenario extremo representa todas las variables críticas que se puedan llegar a presentar en la microcuenca, bien sea por la oferta asociada a las variables hidroclimatológicas y por la baja gestión de los actores del sistema de abastecimiento.

Tabla 4. Estrategias de gestión asociadas a la disminución de consumos y pérdidas técnicas del sistema de abastecimiento.

	Incertidumbres (X)				
	Escenarios de cambio climático			**Crecimiento**	
	Precipitación	**Temperatura**	**Humedad**	**Poblacional**	**Comercial**
Escenario tendencial	18.00%	0.8	-5%	1.25	1.4
Escenario extremo	-18.00%	1.06	-8%	2	2.1

Tabla 5. Incertidumbres asociadas a variables hidroclimatológicas y crecimiento poblacional y comercial.
Fuente: elaboración propia

Estrategias de gestión (L)			
Disminución de consumos			
	Público	**Comercial**	**Viviendas**
Escenario tendencial	-1.8	-1.2	-1.2
Escenario extremo	Sin cambio	-0.5	-0.5
Disminución de pérdidas técnicas del sistema de abastecimiento			
Escenario tendencial	30		
Escenario extremo	40		

De manera adicional, es importante resaltar que se usaron dos expresiones en WEAP para la simulación de los datos hasta el año 2040. Para los escenarios de cambio climático se empleó la previsión lineal (LinForecast). Esta se utiliza para estimar valores futuros en función de una serie temporal de datos históricos. Los nuevos valores se predicen mediante regresión lineal asumiendo una tendencia lineal (y = mx +c) donde el término Y corresponde a la variable a pronosticar y el término X son años. Para la disminución de consumos y el crecimiento poblacional y de comercio se empleó la expresión Growth, esta calcula un valor en un año dado utilizando una tasa de crecimiento del valor del año anterior (crecimiento exponencial) (Stockholm Environment Institute (SEI), n.d.).

Visualización de datos

La visualización de datos explora las potencialidades y limitaciones del sistema mediante visualizaciones dinámicas (Riascos et al., 2014). Aplicado a la presente investigación, la visualización representa los resultados arrojados por la modelación y simulación de datos en el software WEAP. Asimismo, este punto nos permite determinar si los escenarios de cambio climático y las demás variables de incertidumbre y de gestión tuvieron efecto en el abastecimiento hídrico.

Para determinar si la microcuenca de la quebrada El Chamizo cumple con los requerimientos futuros de agua, es decir, si no presentan desabastecimiento, se hace a través de la evaluación y/o análisis de la cobertura de la demanda en porcentaje y la demanda no cubierta en m^3.

Resultados y discusión

Los resultados para la cobertura de la demanda desde las cuentas corrientes o año inicial del modelo permiten ver que no hay una cobertura completa de la demanda, alcanzando únicamente un valor del 65%. Luego de aplicar las estrategias de gestión, y las incertidumbres asociadas a los escenarios de cambio climático, el crecimiento poblacional y comercial, se logró visualizar que al año 2022 se alcanzó un aumento en la cobertura de 87.6% en el escenario tendencial, y de 74 % en el escenario extremo (figura 2). Estos valores, si bien presentan una mejora respecto al año inicial, se visualiza que sigue siendo insuficiente para cubrir la cobertura total.

Por otra parte, al año 2040 el escenario tendencial tiene un incremento de la cobertura del 89.6%, es decir 2% más respecto al año 2022. Esto representa un valor no preponderante teniendo en cuenta que son 18 años de diferencia. Para el caso del escenario extremo se visualiza una disminución progresiva hasta el año 2040, logrando una cobertura de 58.2%, valor que es inferior al año inicial 2021 (figura 2). Este comportamiento atiende especialmente al escenario de cambio climático, el cual presenta una disminución de la precipitación en un 18%, de la humedad en un 8% y el aumento de la temperatura en 1.06°C. Igualmente, porque las estrategias de gestión no son intensivas para este escenario en especial.

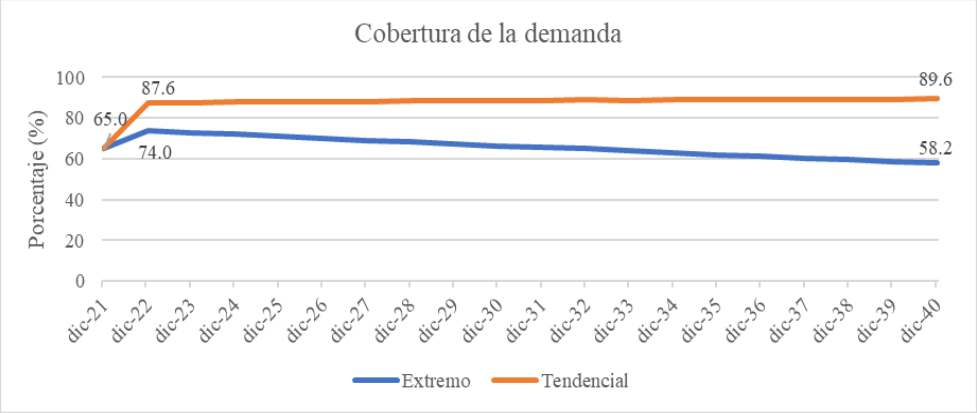


Figura 2. Cobertura de la demanda

Previo a realizar el análisis de la demanda no cubierta es importante resaltar los consumos anuales que tienen los 3 sectores identificados, lo anterior, para lograr dimensionar la problemática del volumen de agua en déficit presente en la microcuenca. En este sentido, el sector comercial actualmente cuenta con 14 suscriptores que consumen al año un total de 16927 m^3, seguidamente las viviendas con 62 suscriptores con un consumo anual de 14.419 m^3, y en última posición el sector público con 2 suscriptores y que tienen un consumo de 5.001 m^3/año. Estos valores en conjunto permiten determinar que el consumo total para los 3 sectores constituye un valor de 36.348 m^3.

De acuerdo con la modelación en WEAP y posterior simulación de datos, se identificó que la demanda no cubierta del año 2021 fue de 24.492m^3, este valor representa el 79.3% del consumo que tiene de manera conjunta el sector público y de viviendas, situación que es preocupante al no cumplir con la demanda total que requieren los demás suscriptores en la microcuenca. Por su parte, en el panorama 2040 la situación solo mejora en el escenario tendencial con una demanda no cubierta de 5.300 m^3, este valor, aunque es un volumen de agua representativo se podría mejorar con estrategias de gestión más rigurosas para disminuir los metros cúbicos en déficit. En el caso del escenario extremo, al año 2040 presenta la cifra más crítica de la demanda no cubierta con 32.702 m^3 (figura 3), este valor al contrastarse con la demanda anual de los 3 suscriptores figura un déficit del 90%.

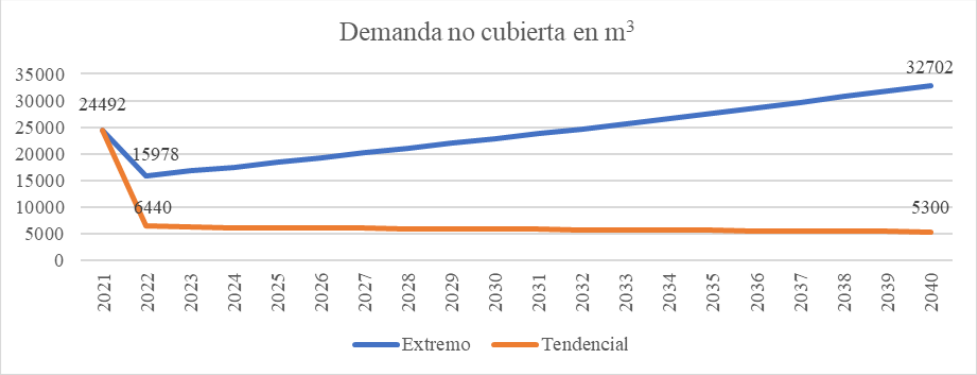


Figura 3. Demanda no cubierta en m^3

De manera final, tanto la cobertura de la demanda como la demanda no cubierta simulada en WEAP, permite visualizar que para la microcuenca de la quebrada El Chamizo bajo los escenarios planteados se enfrenta desde el primer año a un problema de desabastecimiento hídrico al no garantizar la cantidad de agua total que requiere la población.

Conclusiones

Las incertidumbres planteadas para el escenario tendencial denotan que a pesar de las condiciones de aumento de la precipitación, la disponibilidad del recurso hídrico para la microcuenca no alcanza el 100% de su cobertura en todo su periodo de simulación. Esto quiere decir, que cualquier escenario simulado con condiciones climáticas más adversas tendrá mayores dificultades para alcanzar a cubrir la demanda de los suscriptores. El panorama anterior, refleja la vulnerabilidad y baja capacidad de adaptación de la microcuenca ante los escenarios de cambio climático.

Por otra parte, dos estrategias de gestión no son suficientes para lograr alcanzar la cobertura de la demanda que requieren los suscriptores. Se deben sumar estrategias de reconversión de los usos del suelo, y aumentar la eficiencia de los sistemas de abastecimiento para que las pérdidas técnicas cada vez sean menores. A su vez, se requiere de la comunidad para incentivar el uso eficiente y ahorro del agua, empleando alternativas como la recolección de aguas lluvias para la elaboración de actividades en las viviendas, y así disminuir la presión sobre fuentes hídricas superficiales.

Para finalizar, el desabastecimiento hídrico asociado al cambio climático es una realidad, sus impactos se logran apreciar en todo el territorio, en especial en las zonas rurales. Por esta razón, el uso de herramientas de modelación es indispensable para conocer el estado actual y los posibles escenarios futuros, generando así un conocimiento teórico mediante el cual se pueden establecer inferencias sobre una situación determinada y tomar acciones al respecto, cuya finalidad sea la de prevenir y mitigar los cambios en el territorio. De otro lado, para este tipo de investigaciones es importante analizar la vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico desde una mirada micro, puesto que, desde la mirada macro, los efectos de las variaciones del cambio climático no se logran visualizar con mayor detalle.

Referencias bibliográficas

CARDER. (2020). *Programa de Uso Eficiente y Ahorra del Agua PUEAA. Resolución 0925 de 2019* (Issue 57).

Departamento Nacional de Planeacion -DNP-, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible -MADS-, Instituto de Hidrología Meteorologia y Estudios Ambientales -IDEAM-, & Unidad Nacional para la Gestion del Riesgo de Desastres -UNGRD-. (2014). *Plan nacional de adaptación al Cambio Climático. ABC: Adaptación Bases Conceptuales*. 12. http://www.sigpad.gov.co/sigpad/archivos/ABC_Cambio_Climatico.pdf

Espinoza, M. E. gutiérrez y T. (2010). Vulnerabilidad y adaptación al cambio climático Diagnóstico inicial, avances, vacíos y potenciales líneas de acción en Mesoamérica. In *Milenio* (Vol. 22, Issue 2). http://www.oxfam.org.uk/resources/policy/climate_change/downloads/rr_climate_change_adaptation_full_sp_140510.pdf%5Cnhttp://d2ouvy59p0dg6k.cloudfront.net/downloads/documento_bid.pdf

IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & CANCILLERÍA. (2015). Escenarios de Cambio Climático para Precipitación y Temperatura para Colombia 2011-2100. In *Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático* (Vol. 6, Issue 31). http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022963/022963.htm

INECC. (2020). *Catálogo y revisión de metodologías de análisis económico para la adaptación al cambio climático*. http://www.gob.mx/inecc

Instituto del Ambiente de Estocolmo. (2015). *Ríos del páramo al valle, por urbes y campiñas, creando capacidad de adaptación en la planeación de recursos hídricos*. https://www.sei-international.org/mediamanager/documents/Publications/Climate/SEI-USAID-2015-Colombia-informe-final.pdf

Riascos, J. A., Arias, A. de J., Moncada, A., Alarcon, L. M., Patiño, P. J., Duque, A., & Escobar, M. (2014). *Instrumentos de Planificación y Apoyo a Decisiones Robustas (ADR) en la Gestión del Agua en Colombia*.

Stockholm Environment Institute (SEI). (n.d.). *Expressions Overview*. https://www.weap21.org/WebHelp/index.html#ExpForecast.htm

Universidad Catolica de Chile; Stockholm Enviroment Institute. (2009). Guía metodológica. Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP. In *Universidad Catolica de Chile, Stockholm Enviroment Institute*.

ACODAL
ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
65° CONGRESO INTERNACIONAL
Agua, Saneamiento, Ambiente y Energías Renovables
Bogotá - Colombia
Centro de Convenciones Ágora
Julio 13, 14 y 15 de 2022

Instrumentación de bajo costo para el monitoreo de sistemas de agua potable en un acueducto rural en el área metropolitana de Pereira.

Santiago Taborda Giraldo[1*], Melissa Quintero Soto[1*]

Universidad Tecnológica de Pereira.
*Semillero de investigación Ecología, Ingeniería y Sociedad, Universidad Tecnológica de Pereira, Carrera 27 #10-02 - barrio Álamos, Pereira, Risaralda. 660003. Colombia. santiago.taborda@utp.edu.co

Abstract

DRINKING-WATER IS A SCARCE RESOURCE OF GREAT IMPORTANCE IN SOCIETIES WORLDWIDE. HOWEVER, IN LATIN AMERICA, MILLIONS OF PEOPLE STILL HAVE NO ADEQUATE AND SECURE ACCESS TO DRINKING WATER; IN COLOMBIA'S COUNTRYSIDE, THE SITUATION IS NOT BETTER. THEREFORE, THIS STUDY DEVELOPS A LOW-COST, REAL-TIME DEVICE TO MEASURE WATER QUALITY IN SMALL DRINKING WATER SYSTEMS. TO THIS AIM, A PROTOTYPE HAS BEEN BUILT, BASED ON LOW-COST SENSORS AND IOT, TO MEASURE PH, CONDUCTIVITY, TURBIDITY, DISSOLVED OXYGEN, ORP, AMONG OTHERS. ONCE CALIBRATED IN THE LAB, THE DEVICE WAS DEPLOYED ON THE FIELD TO EVALUATE ITS PERFORMANCE. FINALLY, THE DEVICE GATHERED THE WATER QUALITY EVERY FIVE MINUTES, THEN IT TRANSMITTED THE DATA IN REAL-TIME TO A WEB PAGE AND A BASIC MOBILE APP, USING GPRS COMMUNICATION. THE PRELIMINARY RESULTS SHOWED THAT A LOW-COST DEVICE FOR WATER QUALITY MONITORING IS TECHNICAL AND ECONOMICALLY FEASIBLE.

KeyWords: low-cost instrumentation, real-time monitoring, drinking water, water quality, water supply, water treatment

ACODAL
ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL
65° CONGRESO INTERNACIONAL
Agua, Saneamiento, Ambiente y Energías Renovables
Bogotá - Colombia
Centro de Convenciones Ágora
Julio 13, 14 y 15 de 2022

INSTRUMENTACIÓN DE BAJO COSTO PARA EL MONITOREO DE SISTEMAS DE AGUA POTABLE EN UN ACUEDUCTO RURAL DEL ÁREA METROPOLITANA DE PEREIRA.

Resumen

El agua potable es un recurso escaso y de gran importancia en las sociedades de todo el mundo. Sin embargo, en América Latina, millones de personas siguen sin tener un acceso adecuado y seguro al agua potable; en zonas rurales colombianas, la situación no es mejor. Por lo tanto, este estudio desarrolla un dispositivo de bajo costo para medir la calidad del agua en pequeños sistemas de agua potable en tiempo real. Para esto, se ha construido un prototipo, basado en sensores de bajo coste e IoT, para medir el pH, la conductividad, la turbidez, el oxígeno disuelto y el potencial de óxido reducción, entre otros. Una vez calibrado en laboratorio, el dispositivo fue llevado a campo para evaluar su rendimiento. Por último, el dispositivo recolectó los datos de calidad de agua cada diez minutos y transmitió los resultados a una página web y una aplicación móvil básica, utilizando comunicación GPRS. Los resultados preliminares mostraron que el dispositivo de bajo costo para monitoreo de calidad del agua es técnica y económicamente viable.

Palabras clave: Abastecimiento de agua, agua potable, calidad del agua, instrumentación de bajo costo, monitoreo en tiempo real, tratamiento del agua.

Introducción

El agua es la sustancia más abundante del planeta y la única que se encuentra en la atmósfera en estado líquido, sólido y gaseoso. El 97 % es agua que pertenece a los océanos y el resto es agua dulce. Se estima que tan solo el 0.4 % del agua del planeta es apta para el consumo humano, siendo el agua potable un bien vital escaso. Este pequeño porcentaje de agua potable los seres humanos lo necesitan para desarrollar las actividades diarias, por ende, debe ser un derecho fundamental, siendo necesario aumentar el acceso y mejorar los servicios de saneamiento, ya que el consumo de agua no potable influye de forma directa en la salud. (Guerrero *et al*., 2020)

Distintas entidades de regulación presentan algunas inquietudes con la calidad del agua, es por esto que establecen ciertas resoluciones, normas y decretos para asegurar que el agua potable sea de buena calidad y apta para su consumo; la Resolución 2115 de 2007 por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos, frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano y una norma muy importante es la Norma Técnica Colombiana (NTC) 873 donde se establecen las características físicas, químicas y microbiológicos que debe cumplir el agua potable. Algunos parámetros de importancia son la temperatura, pH, conductividad, turbidez, oxígeno disuelto y el cloro residual libre.

La Constitución Política de Colombia, tiene como objetivo que los colombianos tengan acceso al servicio de agua potable, debido a que el abastecimiento adecuado de agua de calidades primordial para impedir casos de morbilidad por enfermedades gastrointestinales, diarrea, cólera, hepatitis A. (Jiménez *et al.,* 2017). Varios autores han realizado diferentes estudios, donde se demuestra la asociación entre las condiciones de saneamiento, incluido el acceso a agua potable, con enfermedades diarreicas. Igualmente, se ha demostrado la importancia de las estrategias de saneamiento en la reducción de las enfermedades diarreicas. Se estima que el 94 % de los casos de diarrea podrían evitarse mediante el aumento de la disponibilidad del agua potable y el acceso al saneamiento básico. La Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que 2,9 millones de personas mueren cada año por enfermedades infecciosas y parasitarias en el mundo debido a la falta de acceso adecuado a fuentes de agua y condiciones de saneamiento; siendo los menores de 5 años los más afectados, ya que ocupan el 90 % de las muertes por consumir agua no potable contaminada. (Guzmán *et al.*, 2015).

La mayoría de las comunidades vulnerables al consumo de agua no potable en Colombia se encuentran ubicadas en los sectores rurales, e intentan darle fin a esta problemática constituyendo sistemas de acueductos rurales para satisfacer la demanda de agua potable en la comunidad. A pesar de los esfuerzos realizados aún persiste un déficit del acceso a agua potable y saneamiento básico en la zona rural, ya que, según el CEPALSTAT, en América Latina y el Caribe para el 2015 el 45% de los habitantes no poseían acceso seguro y adecuado al agua, y en Colombia, según el Programa Conjunto de Monitoreo de Provisión de Agua y Saneamiento, en el 2020 el 59,79% de los acueductos rurales no contaban con un manejo seguro del recurso hídrico. Por ende, esta investigación propone implementar una tecnología de bajo costo que permita un monitoreo en tiempo real de parámetros de calidad del agua. Por lo anterior, se plantea el desarrollo de un dispositivo de bajo costo para la medición en tiempo real de la calidad

y consumo de agua en acueductos rurales y urbanos como soporte a la gestión del agua desde un enfoque integrador de salud y ambiente.La medición de variables de consumo y calidad del agua en tiempo real hace posible la generación de alertas tempranas sobre riesgo sanitario asociado al consumo de agua de mala calidad. Es así como el desarrollo de sistemas de monitoreo en tiempo real junto a la generación de información oportuna puede orientar las entidades públicas y privadas a generar respuestas oportunas o priorizar inversiones en lugares con riesgo para la salud debido al consumo de agua no potable o donde hay desabastecimiento.

Materiales y métodos

Para la investigación en curso se utilizaron diferentes sensores como temperatura, oxígeno disuelto, turbidez, pH, conductividad y potencial de óxido reducción, también se utilizó un microcontrolador, un módulo de comunicación GPRS, módulo de precisión de tiempo real, módulo microSD y una válvula solenoide.

Para la construcción del dispositivo se realizaron los siguientes pasos:

Construcción del prototipo piloto de monitoreo con base en análisis de laboratorio:

- Búsqueda y selección de los sensores y módulos de comunicación a utilizar para el montaje del dispositivo:
    - Se realizó la búsqueda bibliográfica pertinente de las hojas de datos de sensores y módulos para seleccionar las opciones óptimas en el dispositivo.
    - Se seleccionaron los sensores a utilizar en el prototipo piloto.
- Diseño del montaje físico y la programación del prototipo utilizando programas de libre acceso:
    - Se seleccionó un software libre que permite hacer montajes de circuitos electrónicos.
    - Se desarrolló el diseño del montaje físico, basado en dicha aplicación.
- Calibración y ensamble de cada uno de los sensores previamente seleccionados:
    - Una vez se contó con los equipos cada uno fue calibrado con el procedimiento que indica la hoja de datos y usando patrones de medida para construir curvas de calibración.

- Una vez calibrados los sensores se realizó el montaje del primer prototipo de laboratorio en físico, dicho prototipo subirá los datos a un software provisional que fue reemplazado posteriormente por la página web y el aplicativo móvil que se realice.

- Correlación entre los parámetros de la calidad del agua en un acueducto rural.

    - Se tomaron muestras de agua de un acueducto rural de Pereira, midiendo pH, conductividad, turbiedad y otros parámetros según la disponibilidad de equipos del laboratorio para correlacionar sus características fisicoquímicas y microbiológicas.

Diseño de un protocolo de validación in situ del prototipo para identificación e implementación de los ajustes correspondientes:

- Diseño y desarrollo de la metodología de la prueba de campo para examinar el comportamiento del prototipo en medición in situ por tiempo prolongado:

    - Se diseñó el protocolo para una prueba de campo que permita establecer la funcionalidad del equipo en el punto de muestreo del acueducto rural, en este se tuvieron en cuenta parámetros como duración de la prueba, tiempo de muestreo, lugar de la instalación de dispositivo, entre otros.

- Validar y ajustar el prototipo de medición con base en los resultados de la prueba de campo:

    - Se llevó a cabo la prueba de campo con base en el protocolo ya realizado.
    - Se observó el desempeño del prototipo, analizando y listando los aspectos a mejorar del dispositivo en campo.
    - Se ajustó el instrumento de medición.

- Montaje final del dispositivo para medición in situ de forma prolongada:

    - Se ensambló en el punto de muestreo el dispositivo ajustado para medir de forma prolongada las variables de medición.

Diseño y construcción de una base de datos, una página web y una aplicación móvil básica que permitan monitorear de forma remota y en tiempo real a través de internet los datos entregados por el prototipo de medición:

- Aprender el manejo de páginas web y aplicativos basados en software libre:
    - Se realizó un curso de programación de páginas web gratuito en línea basado en software libre.
    - Se buscó información pertinente para el desarrollo básico de aplicativos móviles usando software libre.
- Diseño de página web y aplicativo móvil básico en base a software libre:
    - Se diseñó una página web basada en software libre que permite visualizar los datos entregados por los sensores.
    - Se construyó un aplicativo móvil básico que permite visualizar los datos entregados por los sensores en el celular.
- Ajuste del código del dispositivo de tal manera que permita visualizar la información desde la página web y aplicativo móvil propios:
    - Se ajustó el código del microcontrolador para enviar la información a una base de datos de software libre, desde la cual se abastecerá de información tanto la página web como el aplicativo móvil. Una vez ajustado el código, este se implementó en el prototipo, llegando así al dispositivo final.

Resultados y discusión

El agua debe de tener ciertas características fisicoquímicas para que el agua sea considerada potable, así lo menciona la Resolución 2115 de 2007; para esta investigación sólo se tuvieron en cuenta 6 características fisicoquímicas: temperatura, pH, turbidez, oxígeno disuelto, conductividad y potencial de óxido reducción.

En el curso de la investigación se seleccionó un acueducto rural para instalar el prototipo y monitorear en tiempo real la calidad del agua, este acueducto rural está ubicado en un corregimiento de La Florida en Pereira, Risaralda. El prototipo fue instalado en dicho acueducto y se procedió a monitorear en tiempo real la calidad del agua haciendo uso de los diferentes sensores que lo componen, en el proceso de monitoreo se obtuvo una serie

de datos de forma continua de los días 2 y 3 de mayo de 2022, recolectando 166 datos con un intervalo de aproximadamente 8 minutos. En la tabla 1 se muestran los primeros 18 datos recolectados en la prueba.

Como es mencionado anteriormente, se tuvieron en cuenta 6 características fisicoquímicas, pero en la tabla 1, sólo se muestran 5 de ellas, esto es debido a que el sensor de turbidez estaba presentando errores en las mediciones, por lo que no fue tenido en cuenta en los resultados. En la tabla 1 se pueden observar los valores de pH, temperatura, oxígeno disuelto, conductividad y potencial de óxido reducción.

Con los 166 datos recolectados del monitoreo, se construyeron diferentes gráficas de temperatura, pH, oxígeno disuelto, conductividad y óxido reducción contra la fecha y hora del ensayo, respectivamente. Cada una de las gráficas contiene los límites permitidos por la resolución 2115 de 2007 para cada parámetro establecido.

La gráfica 1 permite observar el comportamiento de la temperatura a través del tiempo; donde sólo algunos valores se salen del límite inferior, siendo estas temperaturas inferiores a 18°C, cuando se presenta esta temperatura, se recomienda al fontanero del acueducto, que el tiempo de contacto del cloro con el agua sea mayor a 30 minutos para obtener una desinfección mejor. Sin embargo, los valores obtenidos no representan riesgo alguno para la salud, ya que la mayoría están dentro del rango establecido por las diferentes resoluciones de agua potable en Colombia.

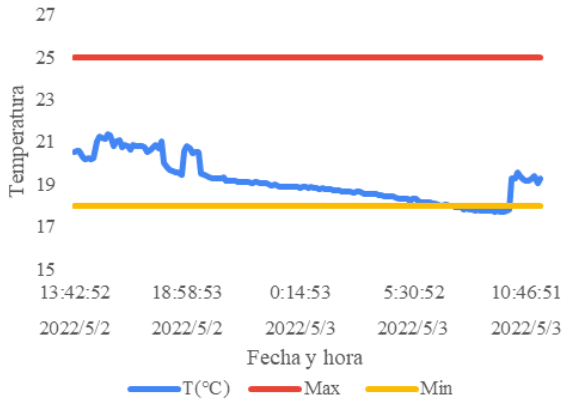
En las gráficas 2, 3 y 4 que corresponden al pH, oxígeno disuelto y la conductividad a través del tiempo respectivamente, se observa que los datos obtenidos estuvieron dentro de los límites permitidos y no generan ningún riesgo para la salud.

La característica fisicoquímica del potencial de óxido reducción se correlaciona con el cloro residual libre en el agua en la gráfica 5 correspondiente al potencial de óxido reducción contra el tiempo, se puede observar que los valores obtenidos están por debajo del límite inferior, el consumo de esta agua con un potencial de óxido reducción menor a 490 mV, presenta un riesgo para la salud, debido que posee una desinfección incompleta y no elimina en su totalidad los microorganismos presentes como lo son los coliformes totales y los coliformes fecales.

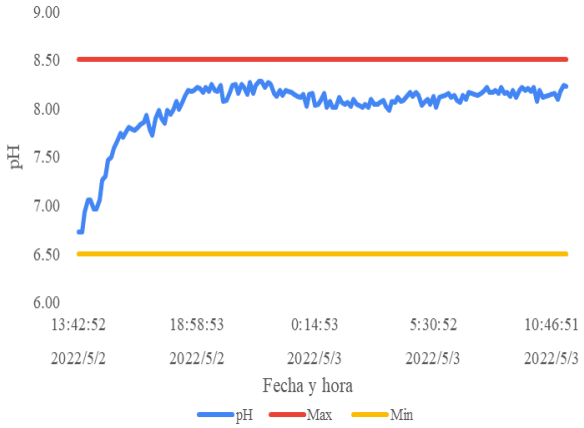
Tabla 1. Datos recolectados por dos días por medio del dispositivo.

Fecha (año/mes/día)	Hora	pH	Temperatura (°C)	Oxígeno Disuelto (mg/L)	Conductividad (µS/cm)	Potencial óxido reducción (mV)
2022/5/2	13:42:52	6.73	20.52	6.08	160.10	288.40
2022/5/2	13:50:46	6.73	20.58	5.84	160.10	263.56
2022/5/2	13:58:40	7.93	20.58	6.26	154.42	323.13
2022/5/2	14:06:34	7.06	20.29	6.28	162.93	348.28
2022/5/2	14:14:28	7.06	20.17	6.15	148.73	377.03
2022/5/2	14:22:22	6.96	20.23	6.24	145.87	389.90
2022/5/2	14:30:16	6.96	20.17	6.13	145.87	404.27
2022/5/2	14:38:10	7.06	20.23	6.02	143.02	405.77
2022/5/2	14:46:04	7.26	21.05	6.15	140.16	416.55
2022/5/2	14:53:58	7.30	21.28	6.17	140.16	447.68
2022/5/2	15:01:52	7.47	21.22	6.11	143.02	417.74
2022/5/2	15:09:46	7.50	21.17	6.06	140.16	444.69
2022/5/2	15:17:40	7.59	21.40	6.08	143.02	398.88

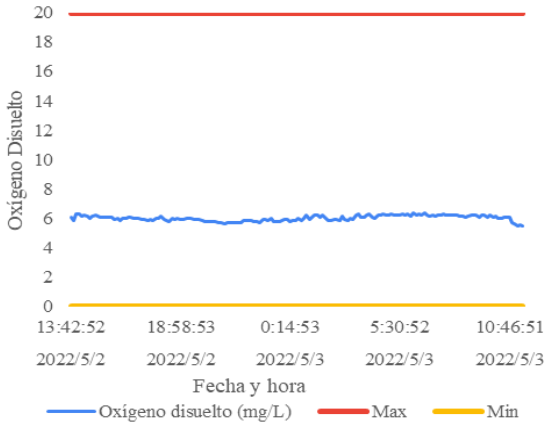
2022/5/2	15:25:34	7.66	21.34	6.04	143.02	419.24
2022/5/2	15:33:29	7.74	20.81	6.08	140.16	408.46
2022/5/2	15:41:23	7.70	21.05	6.04	137.29	440.50
2022/5/2	15:49:17	7.76	21.11	5.90	137.29	439.00
2022/5/2	15:57:11	7.81	20.76	5.95	137.29	427.92



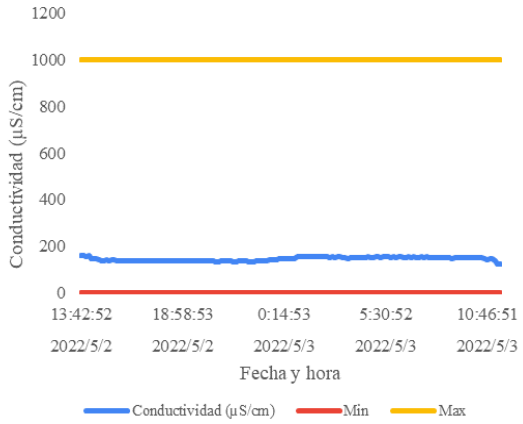
Gráfica 1. Temperatura a través del tiempo.



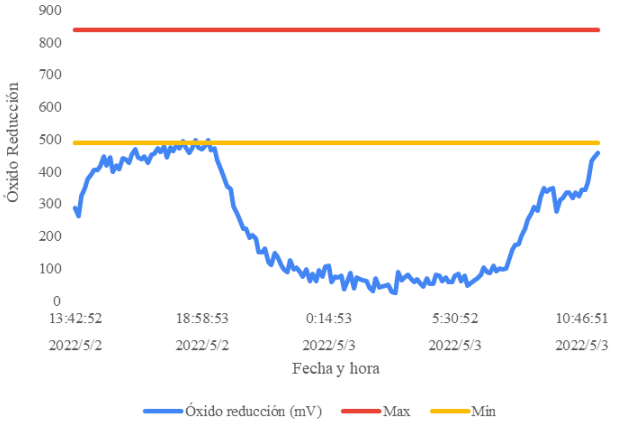
Gráfica 2. pH a través del tiempo.



Gráfica 3. Oxígeno disuelto a través del tiempo.



Gráfica 4. Conductividad a través del tiempo.



Gráfica 5. Potencial de óxido reducción a través del tiempo.

En el transcurso de la investigación se pudo observar varias consideraciones que tiene el dispositivo en este momento, como la interferencia de sensores y cualquier dispositivo eléctrico que entre en contacto con el agua que recibe el dispositivo de medición de variables de calidad de agua, también se observó que la corriente mínima es de 2A para el microcontrolador, es importante mencionar que los sensores con los que se trabaja en dicha investigación requieren una calibración constante y si se cambia la fuente del sistema se deben revisar los sensores, es decir, realizar una nueva calibración.

Respecto al sensor de turbidez, se debe tener especial cuidado ya que es sensible a la luz del ambiente.

Conclusiones

El desarrollo del prototipo permitió realizar mediciones en tiempo real de temperatura, pH, turbidez, conductividad, oxígeno disuelto y el potencial de óxido reducción en un acueducto rural y con una baja inversión, ayudando a la toma de decisiones frente a las estrategias de potabilización del acueducto, así como a la generación de alertas tempranas que eviten el consumo de agua no potable; mostrando con esto la viabilidad técnica y económica del dispositivo.

Referencias bibliográficas

CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe) (2021). Reflexiones sobre la gestión del agua en América Latina y el Caribe. Acceso el 13 de septiembre de 2021. Disponible en: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/46792/1/S2000908_es.pdf

Guerrero, M.D., Barón, J.D., Bedoya, A.D. (2020). Desarrollo de una plataforma interactiva que permita medir y analizar la calidad del agua en zonas rurales de Montería, Córdoba – Colombia.

Guzmán, B.L., Nava G., Díaz P. (2015). La calidad del agua para consumo humano y su asociación con la morbimortalidad en Colombia 2008-2012.

Jiménez C.Y., Sabogal M.A. (2017). Diagnóstico y optimización de la PTAP del municipio de Fómeque, (Cundinamarca). Universidad Católica de Colombia.

Organización Mundial de la Salud (OMS) y del Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF) (2022). Progresos en materia de agua para consumo, saneamiento e higiene en los hogares 2000-2020: cinco años después de la adopción de los ODS. 51-78. Acceso el 13 de septiembre de 2021. Disponible en: https://washdata.org/sites/default/files/2022-01/jmp-2021-wash-households-highlights.pdf