

2026 | INGENIERÍA
HIDRÁULICA Y AMBIENTAL



01

XLVII

Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", CUJAE
Revista científica del Centro de Investigaciones Hidráulicas

ISSN 2788-6050, RNPS 2066

La revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental tiene el propósito de divulgar el conocimiento y contribuir al intercambio de experiencias y la comunicación entre los profesionales y técnicos de habla española. Los temas de interés para la revista incluyen contenidos en la solución de problemas, aplicaciones y desarrollo de la ingeniería hidráulica.

Editor-Director

d. C. Luis Fermín Córdova López

Consejo Editorial

d. C. Daniela Córdova de Horta (*Directora*)

M. Sc. Jaime Ernesto Chiang Cruz (*Secretario de la publicación*)

d. C. Yoermes González Haramboure

d. C. Rafael Pardo Gómez

d. C. Norberto Marrero De León

d. C. Alcides Juan Felipe León Méndez

d. C. Mailén Virgen Gutiérrez Herrera

Consejo Asesor

Damir Brjanovic, *Instituto UNESCO-IHE, Holanda*

Daniel Prats Rico, *Universidad de Alicante, España*

Joaquín Moreno Caselles, *Universidad Miguel Enrique de Elche, España*

Nahún García Villanueva, *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México*

Raúl Lopardo, *Instituto Nacional del Agua, Argentina*

Alejandro López, *Laboratorio Nacional de Hidráulica, Santiago de Chile*

Jaime Iván Ordóñez, *Universidad Nacional de Colombia, Colombia*

Rafael Guarga Ferro, *Instituto de Mecánica de Fluidos e Ingeniería Ambiental, Uruguay*

Abrahán López, *Universidad Francisco de Miranda, Venezuela*

Miguel A. Perozo Ynestroza, *Universidad Francisco de Miranda, Venezuela*

Cristóbal Díaz Morejón, *Ministerio de Ciencia Tecnología y Medioambiente (CITMA), Cuba*

Alina Hernández Tur, *Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH), Cuba*

Rafael Feitó Olivera, *Unión Nacional de Arquitectos e Ingenieros de Cuba (UNAICC), Cuba*

Julián Herrera Puebla, *Instituto de Investigación de Riego, Cuba*

Lorenzo E. Camejo Barreiro, *Universidad de Ciego de Ávila, Cuba*

Alfonso Suárez Reytor, *Universidad de Oriente, Cuba*

Eric Cabrera Estupiñán, *Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Ecuador*

Luis Córdova López, *Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría" (CUJAE), Cuba*

Yoel Martínez González, *Instituto Superior de Ciencias y Tecnologías Aplicada, Cuba*

Ronnie Torres Hugues, *Centro de Servicios Técnicos de Ingeniería y Tecnología de la Construcción, Cuba*

Eduardo López Bastida, *Universidad de Cienfuegos, Cuba*

Javier Orccosupa, *Universidad Tecnológica del Perú, Perú*

Natividad Ramírez Ramírez, *Universidad de Guanajuato, México*

Carlos M. López Vázquez, *Instituto UNESCO-IHE, Holanda*

Julio Iván González Piedra, *Universidad de La Habana, Cuba*

Carlos Javier Fernández de Córdova Webster, *Universidad del Azuay, Ecuador*

Lamberto Alvarez Gil, *Universidad Central de Las Villas (UCLV), Cuba*

Felicita González, *Instituto de Investigación de Riego, Cuba*

Enrique Cisneros, *Instituto de Investigación de Riego, Cuba*

01	Jorge Suárez García Mailén Virgen Gutiérrez Herrera Andrea del Carmen Miranda López	DRENAJE PLUVIAL URBANO EN LAS AVENIDAS CARLOS MANUEL DE CÉSPEDES Y PASEO EN LA HABANA	3 14
02	Jidel Antonio Del Sol Díaz Bryan Pérez León Patricia Ruth de Horta Brito	SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LOS SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE (SUDS). MALECÓN TRADICIONAL DE LA HABANA	15 26
03	Samantha Lazara Cáceres Fuente Daniela Córdova de Horta	METODOLOGÍA ESTRUCTURADA PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE RIEGO AGRÍCOLA MEDIANTE ENERGÍA FOTOVOLTAICA	27 38
04	Kevin Cruz Batista Emilio Escartín Sauleda Patricia Ruth de Horta Brito Luis F. Córdova López	MODELACIÓN NUMÉRICA DE LA PROPAGACIÓN DEL OLEAJE EN EL MALECÓN TRADICIONAL DE LA HABANA MEDIANTE EL MODELO NUMÉRICO SWAN	39 51
05	Alcides J. León Méndez	PRINCIPIOS DEL FLUJÓMETRO DE SECTOR CIRCULAR	52 64
06	Juan Gabriel Chipantiza Masabanda Evelin Laura Zambrano Teresita de Jesús Romero Odalys Méndez Valdés	ESTUDIO DE LA DUREZA TOTAL DEL AGUA A LA ENTRADA DE LA PLANTA POTABILIZADORA DE AGUA "EL CEIBAL". ECUADOR	65 75
07	Nuria de los Ángeles Vaillant López Guillermo Ribeaux Kindelán	TRATAMIENTO MAGNÉTICO EN LA POTABILIZACIÓN Y EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. PARTE I	76 88

Drenaje pluvial urbano en las avenidas Carlos Manuel de Céspedes y Paseo en La Habana

Jorge Suárez García

E-MAIL: jsuarezgarcia400@gmail.com

Dirección de Saneamiento y Electromecánica. Empresa Aguas de La Habana. La Habana, Cuba.

Mailén Virgen Gutiérrez Herrera

E-MAIL:

Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH). Universidad Tecnológica de La Habana, Cuba.

Andrea del Carmen Miranda López

E-MAIL:

Dirección de Saneamiento y Electromecánica. Empresa Aguas de La Habana. La Habana, Cuba.

RESUMEN

Con el incremento poblacional, la demanda de los servicios básicos de agua y alcantarillado aumenta, tanto en zonas rural como urbanas. El correcto funcionamiento de los drenajes pluviales posibilita evacuar las altas precipitaciones y evitar así, desbordes en el sistema de drenaje que se produce por la escorrentía superficial. La escasez de recursos hídricos, la mala calidad del agua y el saneamiento inadecuado influyen negativamente en la seguridad alimentaria para todo el mundo. Esta investigación tiene como objetivo argumentar (desde la experiencia del autor principal de esta investigación y con la tutela de las otras dos autoras) la ejecución de las obras de construcción y/o mantenimiento realizado al sistema de drenaje pluvial urbano en las avenidas Carlos Manuel de Céspedes y Paseo del municipio Plaza de la Revolución en La Habana, que contribuyan al desarrollo de la infraestructura hidráulica, el ahorro de recursos, y la protección y conservación del medio ambiente. Para esto se combinaron diferentes métodos teóricos y empíricos. La idea inicial fue la rehabilitación del conducto de 300 mm, de la senda sur hacia la norte. A medida que se efectuaban estos trabajos, se percibió que era necesaria la ampliación de la obra; se recomienda la continuidad de investigaciones relacionadas con la captación y evacuación de las aguas de lluvia, en búsqueda de otras alternativas técnicas para la mejora de la calidad de vida de la población y la sociedad en general.

PALABRAS CLAVE: construcción, drenaje pluvial urbano, infraestructura hidráulica, mantenimiento, medioambiente

Urban stormwater drainage on Carlos Manuel de Céspedes and Paseo avenues in Havana

ABSTRACT

With population growth, the demand for basic water and sanitation services increases in both rural and urban areas. The proper functioning of stormwater drainage systems allows for the evacuation of heavy rainfall, thus preventing overflows in the drainage system caused by surface runoff. Water scarcity, poor water quality, and inadequate sanitation negatively impact food security worldwide. This research aims to justify (based on the experience of the lead author and with the guidance of the other two authors) the construction and/or maintenance work carried out on the urban stormwater drainage system along Carlos Manuel de Céspedes and Paseo avenues in the Plaza de la Revolución municipality of Havana. These works contribute to the development of hydraulic infrastructure, resource conservation, and environmental protection and preservation. To achieve this, various theoretical and empirical methods were combined. The initial plan was to rehabilitate the 300 mm pipe, from the southbound lane to the northbound lane. As these works were carried out, it became clear that the expansion of the project was necessary; further research related to the collection and evacuation of rainwater is recommended, in search of other technical alternatives to improve the quality of life of the population and society in general.

KEYWORDS: *construction, urban stormwater drainage, hydraulic infrastructure, maintenance, environment*

01 INTRODUCCIÓN

Con el incremento poblacional, la demanda de los servicios básicos de agua y alcantarillado aumenta, tanto en zonas rural como urbanas. El correcto funcionamiento de los drenajes pluviales posibilita evacuar las altas precipitaciones y evitar así, desbordes en el sistema de drenaje que se produce por la escorrentía superficial. La escasez de recursos hídricos, la mala calidad del agua y el saneamiento inadecuado influyen negativamente en la seguridad alimentaria para todo el mundo. Para el 2050, al menos una de cada cuatro personas, probablemente viva en un país afectado por escasez crónica y reiterada de agua dulce, por lo que se hace necesario el trabajo mancomunado de todos los sectores de la sociedad, no solo para garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua, sino, además, el saneamiento para todos (Naciones Unidas, 2018).

El desarrollo hidráulico en Cuba avanza de acuerdo con la Política del Partido y el Gobierno, lo cual responde a los Lineamientos de la Política Económica y Social del Partido y la Revolución (en lo adelante Lineamientos). Las transformaciones en la sociedad cubana han respondido siempre a las necesidades de la sociedad derivadas del contexto económico, político y social de la época; de ahí que, en el lineamiento 180 se plantea: «Consolidar el Plan Hidráulico Nacional para la ampliación, rehabilitación y mantenimiento, con prioridad a los sistemas de riego, acueducto, alcantarillado, drenaje pluvial y al uso eficiente de la infraestructura de los sectores estratégicos» (PCC, 2021, p. 82).

Diversos estudios han demostrado que la gestión sostenible de las aguas pluviales requiere la integración de soluciones técnicas con criterios de ahorro de recursos y protección ambiental. Autores como de Horta Brito y Pino Plans (2021) y Huamani (2025) destacan la importancia del conocimiento sobre los procesos hidráulicos e hidrológicos que intervienen en los sistemas de drenaje pluvial urbano (SDPU) y enfatizan la disposición de herramientas tecnológicas que facilitan el análisis; todos coinciden en que la situación desfavorable de la red se debe principalmente, por el mal estado que posee y la falta de mantenimiento.

Estos antecedentes confirman que la problemática del drenaje pluvial urbano en Cuba requiere soluciones integrales que combinen obras de construcción y mantenimiento con criterios de sostenibilidad. El drenaje pluvial urbano (DPU) constituye uno de los pilares fundamentales de la infraestructura hidráulica en las ciudades contemporáneas, al garantizar la evacuación eficiente de las aguas de lluvia y prevenir afectaciones sociales, económicas y ambientales derivadas de inundaciones.

En La Habana, las avenidas Carlos Manuel de Céspedes y Paseo, pertenecientes al municipio Plaza de la Revolución, presentan deficiencias en sus sistemas de drenaje, lo que repercute en la movilidad, la conservación de las vías y la calidad de vida de la población. La pertinencia de este trabajo se justifica por la necesidad de contribuir con la captación y evacuación de las aguas pluviales en la zona antes mencionada, que favorezca el desarrollo de la infraestructura hidráulica, el ahorro de recursos y la protección y conservación del medio ambiente. A su vez constituyó el informe final para el Ejercicio de Culminación de Estudio del autor principal de esta investigación, en opción al título de Técnico Superior en Agua y Saneamiento, como graduado de la Universidad Tecnológica de la Habana José Antonio Echeverría, CUJAE.

Las inundaciones por intensas lluvias en la avenida Carlos Manuel de Céspedes y avenida Paseo, en la calle Aranguren desde avenida Independencia hasta avenida Carlos Manuel de Céspedes, y en avenida Carlos Manuel de Céspedes y calle San Pedro, todas del municipio Plaza de la Revolución, provocaban afectaciones al tráfico vehicular y a la población, con repercusiones económicas al sector privado y estatal, y también a la empresa Aguas de La Habana.

Estas inundaciones producían roturas de equipos al entrar éstos, en el área inundada, y se generaban pagos por trabajos de recursos humanos fuera de los horarios habituales, además, empleos de equipos especializados y camiones de volteo para las recogidas de desechos sólidos, y traslado de la fuerza de trabajo, lo que provocaba como consecuencias un gasto adicional por concepto de salario y combustible.

En síntesis, todas estas afectaciones eran producidas, entre otras causas, por falta de capacidad de los SDPU; deterioro del sistema de evacuación de las aguas pluviales; unido al crecimiento demográfico, las migraciones del campo a la ciudad, y al cambio climático, donde las lluvias, son más intensas en un corto periodo, se produce el colapso de estos sistemas. En este sentido, el *objetivo* del presente artículo es argumentar (desde la experiencia del autor principal de esta investigación y con la tutela de las otras dos autoras) la ejecución de las obras de construcción y/o mantenimiento realizado al sistema de drenaje pluvial urbano en las avenidas Carlos Manuel de Céspedes y Paseo del municipio Plaza de la Revolución en La Habana, que contribuyan al desarrollo de la infraestructura hidráulica, el ahorro de recursos, y la protección y conservación del medio ambiente.

Para el desarrollo de esta investigación se combinaron diferentes métodos teóricos y empíricos. Los métodos teóricos empleados fundamentalmente fueron el analítico-sintético y el enfoque sistémico los que posibilitaron la obtención de información sobre los SDPU; las tendencias de desarrollo de estos sistemas a nivel internacional, y la propuesta de acciones para la mejora de la calidad de vida de la población.

Como métodos empíricos fundamentales se utilizaron el análisis de documentos, la entrevista a informantes clave, la observación participante y los estudios de casos; todo esto posibilitó un acercamiento a la problemática estudiada; obtener los datos e información sobre el estado de la evacuación de las aguas pluviales en la zona de estudio, los resultados de las acciones acometidas; y la constatación del problema para que su propuesta de solución favoreciera el desarrollo de la infraestructura hidráulica, el ahorro de recursos y la protección y conservación del medio ambiente.

Se utilizaron, además, otros materiales que facilitaron la recolección de la información de la zona de estudio, tal es el caso de: fotografías, y técnica de mapeo. La población (como unidad de análisis) se encuentra en cinco zonas de inundación distribuidas por cuadrantes en el municipio Plaza de la Revolución que abarca: de avenida Línea hasta avenida Malecón y de calle 24 hasta calle K; de calle San Pedro a calle Colón y de avenida Boyeros a calle Marino; de calle San Pedro a calle Pedro Pérez y de calle Ermita hasta Calzada de Ayestarán; en avenida Malecón, de calle K hasta avenida 23; y en avenida 23 de avenida Malecón hasta avenida Infanta.

La dificultad para el trabajo con esta población, unida a la riqueza de información demandó la selección de una muestra no probabilística de «casos-tipo» (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2023, p. 451). Se trabajó en las avenidas Carlos Manuel de Céspedes y Paseo.

La investigación respondió a uno de los problemas que tenía identificado el Departamento Técnico de Drenaje Pluvial, de la Subdirección de Saneamiento y Drenaje Pluvial perteneciente a la Dirección de Saneamiento y Electromecánica, de la empresa Aguas de La Habana, y se atendió específicamente uno de los planteamientos de la población en asambleas de rendición de cuentas del delegado de la circunscripción, que durante años se había acumulado, lo que perjudicaba, no solo a los vecinos del lugar, sino a transeúntes foráneos y extranjeros.

02 SISTEMA DE DRENAJE PLUVIAL URBANO

Para el estudio de los SDPU a nivel internacional, constituyó un referente de obligada consulta los autores Villegas et al. (2019); éstos resumen que Estados Unidos, Canadá, Australia y algunos países europeos, en las últimas décadas, han desarrollado algunas estrategias para la gestión de las aguas pluviales; aprovechan este recurso para el uso de la ciudad y la arquitectura lo que conlleva a la eliminación de riesgos de inundaciones. En Europa (Dinamarca, Suecia, Bélgica, Suiza y Francia) han establecido estrategias relacionadas con la gestión de las aguas pluviales urbanas, con incidencia en el diseño urbano; es válido destacar que estos países se encuentran a la vanguardia en este sentido.

De igual forma, Australia se destaca por innovadoras propuestas de ciudades sensibles al agua, al ser un interés del gobierno federal y estatal; crean espacios públicos a cielo abierto que acopian, purifican y hacen uso de las aguas pluviales, de modo que aportan belleza y serenidad al paisaje urbano. Debe destacarse que, la urbanización de la Sabana de Bogotá (Colombia) durante el siglo XX, como parte del proceso de ordenamiento y planificación, alteró el paisaje sin tener en cuenta los sistemas de drenaje natural del territorio. En la actualidad, este último país comienza a ser valorado y vinculado a planes, programas y estrategias (Villegas et al., 2019).

Como resultado del análisis de documentos, se constató que, en el orden académico e investigativo, constituye un interés significativo la gestión de los SDPU. Lo anterior se pone de manifiesto en la Pontificia Universidad Javeriana, la Universidad Nacional de Colombia, la Universidad del Rosario, y la Universidad de América; mediante proyectos investigativos analizan la viabilidad económica y técnica del aprovechamiento del agua de lluvia en el campus y su posible uso en función de su calidad. Si hoy no se ha implementado el resultado de estos estudios, obedece al poco interés de las políticas gubernamentales del país.

Por otra parte, en España es tratado como Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS); consisten en técnicas de gestión de aguas pluviales y planeamiento urbano que persiguen reproducir y/o restituir los procesos hidrológicos previos al desarrollo urbanístico; integran estratégicamente elementos de control de escorrentía en el paisaje urbano y prestan especial atención al impacto del cambio climático (CONAMA, 2018).

Los sistemas antes mencionados son compatibles con los tradicionales de gestión de aguas pluviales urbanas, y se alinean con los tres ejes básicos de la sostenibilidad: economía, medio ambiente y sociedad (CONAMA, 2018) y cuentan con una trayectoria de casi 50 años. En esta proyección se encuentra Nueva York, Philadelphia, Washington DC, San Francisco, Londres, París, Melbourne o grandes aglomeraciones chinas como Wuhan que han adoptado recientemente las estrategias denominadas «ciudad esponja», que va de la mano de las nuevas tendencias marcadas por la infraestructura verde.

La presencia de aguas pluviales en áreas urbanas donde los sistemas de drenaje son deficientes, se constituyen en causales para que las aguas provenientes de las lluvias se estanquen, instaurándose en una fuente de proliferación de bacterias y mosquitos causantes de muchas enfermedades infectocontagiosas, así como perjudicando el libre tránsito de personas y vehículos, por lo que la población no puede desarrollar sus actividades cotidianas con normalidad (Fernández, 2021).

En síntesis, entre los aspectos más importantes relacionados con los SDPU, en los países estudiados, se develó que: el poco accionar de los gobiernos eleva los riesgos de contraer enfermedades; las soluciones constructivas abren mejores alternativas para la gestión; el crecimiento demográfico, las migraciones campo-ciudad y las indisciplinas sociales atentan contra su correcto funcionamiento; el impacto en la construcción de las estructuras urbanas debe minimizarse; y la captación y evacuación de las aguas de lluvia tienen disímiles alternativa de solución en función de los tres ejes básicos de la sostenibilidad.

Después de estudiar los criterios y metodologías en otras latitudes, los autores analizan la realidad nacional, específicamente en una zona del municipio Plaza de la Revolución, en La Habana, con el objetivo de argumentar las acciones realizadas para la mejora de la calidad de vida de la población.

03 SISTEMA DE DRENAJE PLUVIAL URBANO DEL MUNICIPIO PLAZA DE LA REVOLUCIÓN EN LA HABANA

En La Habana existen 400 km de redes de drenaje pluvial urbano, con 30 481 tragantes asociados en 161 cuencas hidrográficas y dentro de ellas, existen 175 zonas de inundación, distribuidas en sus 15 municipios. En la parte centro-oeste de La Habana, existen 64 cuencas de drenaje, con 78 zonas de inundación en los municipios: Centro Habana, Cerro, Diez de Octubre, La Habana Vieja, Plaza de la Revolución, La Lisa, Marianao y Playa.

El este de la Capital consta de 29 cuencas, con 72 zonas de inundación, que abarcan los municipios: Habana del Este, Guanabacoa, Regla, San Miguel del Padrón y el Cotorro; en el sur se encuentran 68 cuencas con 25 zonas de inundación, ubicados en los municipios Arroyo Naranjo y Boyeros. De las 175 zonas de inundación, por penetraciones del mar se encuentran 20 asociadas al litoral norte habanero y 155 por intensas lluvias; se han realizado 20 estudios de proyecto que abarcan soluciones para 25 de estas zonas. Hasta el momento se ha ejecutado uno en la Tribuna Antimperialista y tres en proceso de ejecución los cuales son (Del Castillo, 2019): el drenaje de San Agustín; el Pontón, y Cueva del Indio.

El sistema de drenaje pluvial urbano del municipio Plaza de la Revolución en La Habana, está construido con tuberías de varios diámetros que van desde 200 mm a 2100 mm. Estas redes de drenaje pluvial tienen conductos de diferentes materiales como son: Polietileno de Alta Densidad (PEAD), tubería corrugada, barro, asbesto cemento y de ladrillos (estos últimos son los ubicados en calle J de calle Línea hacia la calle 23).

Este se construyó entre los años 1902 y 1908, al igual que el sistema de alcantarillado de La Habana, cuenta con 65,3 km de redes de drenaje pluvial urbano con 4151 tragantes asociados. Este municipio tiene 12 cuencas de drenaje, todas evacuan el agua hacia el litoral norte habanero, excepto una que lo hace al río Almendares. Cada una de estas cuencas se corresponden con un sistema de drenaje pluvial, por lo tanto, el drenaje se efectúa a través de estos conductos, dada la topografía del territorio también el drenaje pluvial se realiza de forma natural por escurrimiento superficial (Departamento de Drenaje Pluvial, Aguas de La Habana, 2019).

Para el mantenimiento del drenaje pluvial en el municipio, se cuenta con dos brigadas que realizan la limpieza de estos tragantes cada 28 días; una vez que éstas detectan roturas u obstrucciones, reportan las afectaciones con el objetivo de su solución. Como resultado del crecimiento poblacional del municipio, la acción antrópica y el desarrollo de la ciudad, ha afectado al drenaje pluvial. Áreas donde antes se producían drenajes naturales por infiltración y escurrimiento hacia el río o el mar hoy se han pavimentado y poblado, por lo que las aguas pluviales escurren hacia las zonas bajas y se originan afectaciones por inundaciones.

Uno de los objetivos fundamentales para lograr una mayor evacuación del drenaje pluvial urbano, está basada en los mantenimientos preventivos y correctivos en la época del periodo húmedo y en la temporada de huracanes, donde se refuerzan estos mantenimientos; en muchas ocasiones hay que ejecutar los mantenimientos correctivos debidos a la indisciplina social y estatal.

Este municipio cuenta con cinco zonas de inundaciones; en el litoral, estas se producen debido a la penetración del mar, a lluvias intensas y por la combinación de las fuertes lluvias con la pleamar. Hay proyectos para la disminución de sus efectos, un ejemplo de ello es la ejecución del proyecto de la Tribuna Antimperialista.

Dentro del banco de problemas de la empresa, se le asignó al autor principal de este trabajo (con la tutela de las otras dos autoras), la solución de algunos puntos de inundación en las áreas de:

1. Calle San Pedro desde avenida Carlos Manuel de Céspedes a calle Estancia.
2. Calle Aranguren desde las avenidas Independencia hasta Carlos Manuel Céspedes.

La primera tarea consistió en buscar los registros pluviométricos, en un periodo entre enero de 2018 y marzo de 2019, con la finalidad de identificar las posibles soluciones a esta problemática. La organización del trabajo a realizar por parte de los autores, apoyados en la entrevista a informantes clave, el análisis de documentos, fotografías y técnicas de mapeo, constó de las siguientes *acciones generales*:

1. Búsqueda de información técnica relacionada con el área.
2. Inspección visual del área.
3. Diagnóstico y evaluación del tiempo de evacuación de la escorrentía provocada por la lluvia.
4. Acciones constructivas y/o de mantenimientos:
 - Calle Independencia y calle San Pedro.

- Avenida Carlos Manuel de Céspedes y calle San Pedro.
- Calle Aranguren y avenida Carlos Manuel de Céspedes.
- Calle San Pedro y calle Marino.
- Avenida Paseo entre las avenidas Carlos Manuel de Céspedes e Independencia.
- Avenidas Carlos Manuel de Céspedes y Paseo.

04 PARTICULARIDADES DE LAS ACCIONES DE CONSTRUCCIÓN Y/O MANTENIMIENTO DE LA INFRAESTRUCTURA DE DRENAJE PLUVIAL URBANO DE LA ZONA COLINDANTE A LA PLAZA DE LA REVOLUCIÓN

Como parte de la *primera acción* se procedió con la búsqueda de la documentación técnica, archivada en el Departamento Técnico de Drenaje, de la Subdirección de Saneamiento y Drenaje Pluvial en la empresa Aguas de La Habana, relacionados con estas áreas de inundación. Además, de la búsqueda en el Sistema de Información Geográfica - Geographic Information Systems (GIS), de las redes del sistema de drenaje pluvial. La *segunda acción* consistió en realizar recorridos en el área objeto de estudio; se analizaron los posibles lugares de ubicación de las nuevas captaciones. Así como, se determinaron las áreas de mantenimiento a los sistemas de drenaje pluvial, reparaciones y/o ampliaciones de diámetros de entronques, de los tragantes hacia el sistema.

Como resultado del análisis de documentos y la observación, se pudo constatar que, en el 2018 existían 21 registros de más de 20 mm de lluvias en el municipio Plaza de la Revolución, cuyo promedio fue de 38,2 mm, al ser el mes más alto el de diciembre, con un registro de 105 mm (todos los registros en 24 horas). Es de destacar que en los días que se presentaron inundaciones en estas zonas, los registros de lluvia estaban en 47 mm en 30 minutos de lluvia sostenida, de 52 mm en 40 minutos, y de 45 mm en 27 minutos, estos registros se usan como estrategia de trabajo en este territorio, ya que cuando hay lluvias intensas se producen inundaciones, una vez que comienzan estas las lluvias intensas, se toma el tiempo de duración y se realiza la medición del pluviómetro para dirigir las acciones de trabajo en las áreas de inundación, según se requieran.

En el año 2019 había 16 registros pluviométricos con lluvias en este municipio, cuyo promedio fue de 40,97 mm y los registros más altos fueron de 81 mm en el mes de enero. Se consideró esta última información como punto de partida para la solución del problema de investigación declarado.

Como consecuencia de lo anterior, se evidenció que la ocurrencia de estas avenidas, ocasionaban desplazamientos hacia estas áreas, de equipos y fuerza de trabajo fuera del horario laboral, por lo que representaban un gasto adicional (económico y de combustible) para la empresa. Posterior a esto se comenzaron a evaluar los SDPU del área de estudio: se realizaron recorridos, se revisaron estos sistemas en los lugares donde más se acumulaba el agua durante las propias avenidas y la demora de su evacuación; todo esto formó parte de la *tercera acción*. Para darle cumplimiento a las acciones constructivas y/o de mantenimiento (*cuarta acción*), se hizo necesario cumplir con lo estipulado en el Reglamento del Proceso Inversionista en Cuba, relacionado con los niveles de aprobación necesarios para la ejecución de las obras.

Se constató la existencia de la permisología legal (Licencia de Obra y compatibilización con los organismos implicados), que posibilitó el inicio de las acciones acorde con la legalidad socialista. Es válido aclarar que, debido a la dinámica que impone todo proceso constructivo y en el marco de la fecha conmemorativa del 500 Aniversario de la fundación de La Habana, además, se obtuvieron permisos de carácter expedito.

A continuación, se detallan las acciones realizadas en los puntos de inundación de las áreas mencionadas con anterioridad (Tabla 4.1).

Al comenzar este trabajo el autor principal de esta investigación, junto con la brigada que acometió la tarea, se percataron que había que profundizar y ampliar la obra, porque no coincidía la información técnica con lo real del sistema de drenaje. Es válido señalar que la idea inicial fue la rehabilitación del conducto de 300 mm, de la senda sur hacia la norte. Una vez iniciada las excavaciones, en lugar de un solo conducto, se dieron cuenta que existían dos del mismo diámetro en paralelo, el material era de asbesto cemento y que estos se encontraban empotrados en el cimiento central del puente, por lo que era imposible realizar la rehabilitación completa de los dos conductos encontrados (Fig. 4.4).

Tabla 4.1. Acciones realizadas en las avenidas y/o calles objeto de estudio.

Avenidas y/o calles	Acciones realizadas
Avenida Independencia y la calle San Pedro	Se ejecutó mantenimiento a 530 m del sistema de drenaje pluvial urbano con diámetro de 600 mm. Se construyeron dos registros, ya que la distancia entre ellos era superior a 100 m, lo que dificultaba las acciones de mantenimiento preventivo o correctivo.
Avenida Carlos Manuel de Céspedes y la calle San Pedro	Se repararon tres tragantes combinados (dos modelos diferentes) y se sustituyó 24 m de entronque de drenaje, con diámetro de 400 mm, que se encuentra conectado al río San Pedro, el que está canalizado con cajones de 2 x 2 m.
Calle Aranguren y la avenida Carlos Manuel de Céspedes	Se ejecutaron acciones de construcción para ampliar la captación y limitar el gasto hacia la parte baja del puente de la avenida Paseo. Se construyó una batería de seis tragantes y se ejecutó el entronque hacia el colector con diámetro de 315 mm. Se repararon y limpiaron nueve tragantes y se reparó un registro de 24", que forma parte del sistema de drenaje pluvial urbano que se encontraba bajo el asfalto. Además, se le ejecutó mantenimiento a 163 m de este sistema de drenaje pluvial urbano en la calle Aranguren.
Calle San Pedro y calle Marino	Se construyó una batería de 14 tragantes con la reparación y limpieza de otros cuatro; se ejecutó el entronque de esta batería con tubería de diámetro de 315 mm (Fig. 4.1).
Calle San Pedro y calle Estancia	Se construyó una batería de siete tragantes y a su vez se instalaron dos entronques de 315 mm (Fig. 4.2).
Avenida Paseo e/ las avenidas Carlos Manuel de Céspedes e Independencia	Se ejecutó el mantenimiento a 100 m del sistema de drenaje pluvial urbano y se limpiaron un total de 12 tragantes.
Avenidas Carlos Manuel de Céspedes y Paseo	Esta obra es representativa de este trabajo investigativo; se diseñó para ejecutar, únicamente, el mantenimiento correctivo de las redes de drenaje pluvial (Fig. 4.3).

[fuente: elaboración propia]



Figura 4.1. Construcción de una batería con 14 tragantes (elaboración propia).



Figura 4.2. Construcción de una batería de siete tragantes (elaboración propia).



Figura 4.3. Mantenimiento correctivo de las redes de drenaje pluvial (elaboración propia).



Figura 4.4. Existencia de dos conductos en paralelo (elaboración propia).

A medida que se efectuaban estos trabajos, se percibió que era necesaria la ampliación de la obra; también se ejecutaron acciones de mantenimiento donde se limpiaron 10 tragantes, cuatros registros en tuberías de 750 mm de drenaje (Fig. 4.5). Se sustituyeron cuatro registros Modelo 6 y un aro y tapa de registros de 24"; además se ejecutó el mantenimiento a 150 m del sistema de drenaje pluvial urbano hacia la calle Aranguren y 120 m hacia la calle Colón por la avenida Carlos Manuel de Céspedes.



Figura 4.5. Limpieza de tragantes (elaboración propia).

Lo anterior conllevó a repensar desde el conocimiento adquirido por los autores y por la pericia que los caracteriza, en una nueva forma de ejecución del trabajo, para el logro de un mejor nivel de servicio, y que generara a su vez, un valor para la empresa. Por lo que se propuso hacer el cambio del trazado (previa conciliación con el Departamento Técnico de Drenaje Pluvial y con la Dirección de Saneamiento y Drenaje Pluvial) dada la imposibilidad de rehabilitar completamente los dos conductos de 300 mm. Una vez autorizada la propuesta, se solicitaron los servicios de la comisión de topografía, con el objetivo de realizar el levantamiento del lugar y comprobar si la pendiente era favorable para el nuevo trazado.

Después de haber recibido el informe del levantamiento topográfico, se decidió ejecutar la obra que consistía en instalar 42 m de tubería con diámetro 630 mm, se construyeron tres registros; se repararon y se les dio mantenimiento a las dos líneas de drenaje de 300 mm, y se rehabilitaron los dos tramos en la senda sur que consistían en ocho metros de cada conducto de 300 mm y la reparación de dos tragantes.

05 BENEFICIOS ECONÓMICOS, AMBIENTAL Y SOCIAL COMO RESULTADO DE LAS ACCIONES REALIZADAS

Se muestra una tabla comparativa, donde se relacionan los principales materiales utilizados, y el ahorro económico, con las acciones oportunas de construcción y/o mantenimiento, realizada antes de la implementación del

Proceso de Ordenamiento Monetario como instrumento fundamental de las modificaciones del Modelo Económico y Social Cubano de Desarrollo Socialista, a la infraestructura de drenaje pluvial urbano de la zona colindante a la Plaza de la Revolución, en La Habana (Tabla 5.1).

Tabla 5.1. Comparación de precios unitarios (solo materiales) antes y después del reordenamiento monetario en Cuba con el correspondiente ahorro económico total, del trabajo constructivo y de mantenimiento ejecutado oportunamente.

Descripción	UM	Cantidad (U)	P. Anterior (CUP)	Total (CUP)	P. Actual (CUP)	Total
TAPA DE ALCANTARILLADO 24"	U	3	40,34	121,02	2 187,72	6 563,16
ARO 24 REG. DE ALCANT. 24"	U	3	42,55	127,64	3 515,21	10 545,63
MARCO DE REJA IRWING	U	28	51,58	1444,13	1 376,82	38 550,96
PARRILLA IRWING	U	28	64,52	1806,56	2 593,28	72 611,84
BLOQUE DE 20 CM	U	650	0,99	643,50	8,00	53 300,00
CEMENTO PP 350	saco	90	5,71	513,90	121,60	10 944,00
BARRA CORRUGADA 5/8" MN	m	25	5,33	133,25	89,22	2 230,50
ARENA LAVADA M.N	m ³	8	24,44	195,52	308,91	2 471,28
GRAVILLA MN	m ³	12	13,34	160,08	241,06	2 892,72
Tubería 315 mm	m	24	47,38	1 137,12	468,81	11 251,44
Tubería 630 mm	m	42	81,23	3 411,66	595,79	25 023,18
Manguito 315 mm	U	3	6,18	18,54	222,58	667,74
Manguito 630 mm	U	5	39,57	197,85	457,59	2 287,95
Total				9 910,76		239 340,40

Esto, sin lugar a dudas tuvo además, un beneficio social y medioambiental, evidenciándose: mayor integración paisajística; mitigación de los efectos adversos que la escorrentía urbana provoca al medio ambiente; disminución del encharcamiento por largos períodos; mejora la imagen urbana; mejora la infraestructura peatonal y vial; reducción de riesgos viales; mayor control de las inundaciones y se evitan enfermedades; se minimiza el impacto por inundaciones en las estructuras urbanas; reducción de futuras inversiones en las infraestructuras hidráulicas; menos afectación al espacio público; reducción del impacto de la acción del agua, sobre los ecosistemas; mayor compatibilidad con el contexto urbano; mejores condiciones de vida para los ciudadanos residentes en la zona y transeúntes, entre otros.

En síntesis, con la aplicación del conocimiento adquirido por el autor principal de esta investigación y con la tutela de las otras autoras, para la solución del problema identificado, se contribuyó, sin lugar a duda con el desarrollo de la infraestructura hidráulica, el ahorro de recursos, y la protección y conservación del medio ambiente, transformándose los resultados en riqueza económica, bienestar social y desarrollo humano.

06 CONCLUSIONES

Los resultados del análisis del tratamiento dado internacionalmente a los SDPU y la caracterización de la zona de estudio del municipio Plaza de la Revolución en La Habana, posibilitaron la identificación de acciones generales de construcción y/o mantenimiento a realizar de inmediato, para el beneficio social.

Como resultado de la ejecución de las obras de construcción y/o mantenimiento, del drenaje pluvial urbano en las avenidas Carlos Manuel de Céspedes y Paseo del municipio Plaza de la Revolución en La Habana, se argumentó (desde la experiencia del autor principal de esta investigación y con la tutela de las otras dos autoras) el trabajo realizado, donde se develó su contribución al desarrollo de la infraestructura hidráulica, el ahorro de recursos, y la protección y conservación del medio ambiente; se visualiza un ahorro económico de 229 429,64 CUP.

07 REFERENCIAS

- CONAMA. (2018). *Agua y Ciudad, Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible RUMBO 20.30*. Congreso Nacional del Medio Ambiente. Madrid, España.
- de Horta Brito, P. R., & Pino Plans, L. M. (2021). Simulación numérica de la red de drenaje pluvial de la cuenca Gancedo. La Habana. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental, XLII(4)*, 18-32.

- Del Castillo, S.** (2019). *Zonas de Inundación de Plaza de la Revolución*. Aguas de La Habana. La Habana, Cuba.
- Departamento de Drenaje Pluvial, Aguas de La Habana.** (2019). *Informe Anual del Drenaje Pluvial Urbano del Municipio Plaza de la Revolución*. Aguas de La Habana. La Habana, Cuba.
- Fernández, E. L.** (2021). *Análisis del impacto ambiental del sistema de drenaje pluvial en la Urbanización Campo Real, ciudad de Cajamarca 2021* [Tesis]. Universidad Privada del Norte.
- Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. H. P.** (2023). *Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw-Hill Interamericana Editores, S.A. de C.V.
- Huamani, L. H.** (2025). *Planteamiento de los SUDS en la eficiencia del sistema de drenaje pluvial urbano de la ciudad de Kimbiri* [Tesis de Ingeniero Civil]. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga. Consultado el 1 de julio de 2026, desde <https://repositorio.unsch.edu.pe/bitstreams/96bc5292-795f-48d1-b74e-eadc6052490/download>
- Naciones Unidas.** (2018). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe (LC/G.2681-P/Rev.3)*. Naciones Unidas. Santiago, Chile.
- PCC.** (2021). *Lineamientos de la política económica y social del partido y la revolución para el período 2021-2026*. Partido Comunista de Cuba. La Habana, Cuba.
- Villegas, E., Sandoval, G., Casas, E. I., Cortés, O. A., & Molina, L. F.** (2019). *Gestión estratégica del recurso pluvial urbano*. Colombia.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribución de los autores

Jorge Suárez García <https://orcid.org/0009-0000-1464-7735>

Mailén Virgen Gutiérrez Herrera <https://orcid.org/0000-0002-9319-0653>

Andrea del Carmen Miranda López <https://orcid.org/0009-0006-6422-243X>

Simulación numérica de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS). Malecón Tradicional de La Habana

Jidel Antonio Del Sol Díaz

E-MAIL:

Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", CUJAE. La Habana, Cuba.

Bryan Pérez LeónE-MAIL: perezleonbryan856@gmail.com

Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", CUJAE. La Habana, Cuba.

Patricia Ruth de Horta Brito

E-MAIL:

Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", CUJAE. La Habana, Cuba.

RESUMEN

El aumento de la urbanización conlleva a que los sistemas de drenaje pluvial sean insuficientes a la hora de evacuar intensas lluvias, provocando recurrentes inundaciones pluviales. Ante esta situación surgen los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) como una solución innovadora que imita el ciclo hidrológico y embellece el entorno urbano. La investigación aborda la simulación numérica de la red de drenaje pluvial en dos zonas del Malecón Tradicional de La Habana, evaluándose el comportamiento hidráulico de la misma con un período de retorno de 5 y 50 años, para las condiciones actuales y con propuesta de solución basándose en la implementación de los SUDS.

PALABRAS CLAVE: *urbanización, inundaciones, SUDS*

Numerical Simulation of Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS). Havana's Traditional Malecón

ABSTRACT

The increase in urbanization leads to stormwater drainage systems being insufficient for evacuating intense rainfall, causing recurrent pluvial flooding. In response to this situation, Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) emerge as an innovative solution that mimics the hydrological cycle and enhances the urban environment. The research addresses the numerical simulation of the stormwater drainage network in two areas of the Traditional Malecón in Havana, evaluating its hydraulic performance of the network for return periods of 5 and 50 years, considering both current conditions and a proposed solution based on the implementation of SUDS.

KEYWORDS: *urbanization, floods, SUDS*

01 INTRODUCCIÓN

Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) emergen como una respuesta fundamental a la mitigación de inundaciones. Lejos de ser una solución meramente infraestructural, los SUDS no solo brindan control de la cantidad de agua, sino que también mejoran su calidad y aumentan el confort y la biodiversidad de las ciudades como pilares fundamentales. Estos nuevos enfoques se presentan como soluciones de bajo impacto ambiental, que buscan incrementar la capacidad de las ciudades de gestionar el agua de lluvia e imitar lo más posible el ciclo hidrológico natural de la región antes de su urbanización, mediante la implementación de infraestructuras

ecológicamente sostenibles (Pérez Hurtado, 2020).

Se evalúa el uso de los SUDS con el fin de mitigar los episodios de inundación, mejorar la gestión de las aguas de escorrentía y contribuir a la resiliencia urbana. Para cuantificar con precisión el alcance y efectividad de las soluciones propuestas, la investigación emplea el modelo matemático Iber-SWMM. Este software permite analizar el comportamiento hidráulico de la red de drenaje existente y con la inclusión de los SUDS para iguales precipitaciones y períodos de retorno.

El caso de estudio se centra en el Malecón Tradicional de La Habana, enmarcado en el tramo comprendido entre las calles Marina y Paseo del Prado. En esta área se van a estudiar dos zonas específicas, identificadas como críticas por la recurrencia de inundaciones pluviales.

02 UBICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL ÁREA DE ESTUDIO

El Malecón Tradicional de La Habana, enmarcado en el tramo comprendido entre las calles Marina y Paseo del Prado ocupa un área de 3,42 km² y su superficie se encuentra totalmente urbanizada con pocos espacios libres. Presenta una población aproximada de 160 000 habitantes para una densidad de 47174 hab/km² y constituye uno de los más antiguos centros urbanos que se desarrolló desde la época colonial (Córdova López, 2020).

Debido a que en esta área se presentan puntos de inundación, se escogen dos zonas de estudio, con el objetivo de analizar estos fenómenos. Estas zonas se salen un poco del área del Malecón Tradicional para poder estudiar el comportamiento de las pendientes aguas arriba a los puntos de inundación. La primera zona tiene un área de 0,998 km² y está comprendida entre las calles Infanta (al este), Zanja (al sur), Escobar (al oeste) y el Malecón de La Habana (al norte). La segunda zona de estudio tiene un área de 0,81 km² y está comprendida entre las calles Galeano (al este), Dragones (al sur), Avenida Bélgica (al oeste) y el Malecón de La Habana (al norte).

03 DETERMINACIÓN DEL HIETOGRAMA A PARTIR DEL MÉTODO DE BLOQUE ALTERNOS

En la figura 3.1 se muestran las curvas IFD (Intensidad-Frecuencia-Duración) para periodos de retorno de 5 y 50 años. Estas curvas están asociadas a probabilidades de ocurrencia del 20 % y el 2 % respectivamente. Los valores de intensidad se representan en función del tiempo, considerando una duración de lluvia de 6 horas con intervalos de 5 minutos.

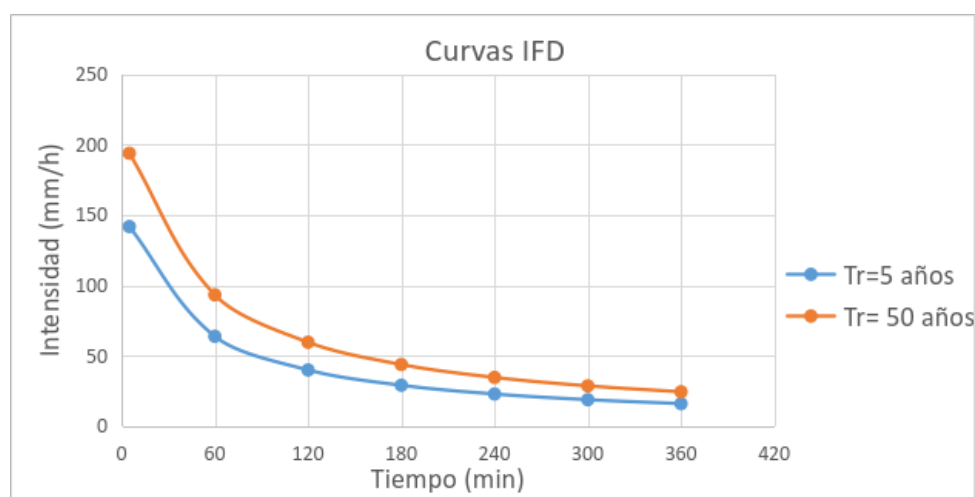


Figure 3.1. Curvas IFD para periodos de retorno de 5 y 50 años.

Para la construcción del hietograma se procede colocando en el centro la mayor precipitación registrada en los 5 minutos más lluviosos. A su derecha, se coloca la precipitación registrada en el segundo intervalo más lluvioso. A la izquierda, la registrada en el tercer intervalo más lluvioso, a la derecha la cuarta y así alternando con los demás intervalos, como se esboza en las figuras 3.2 y 3.3:

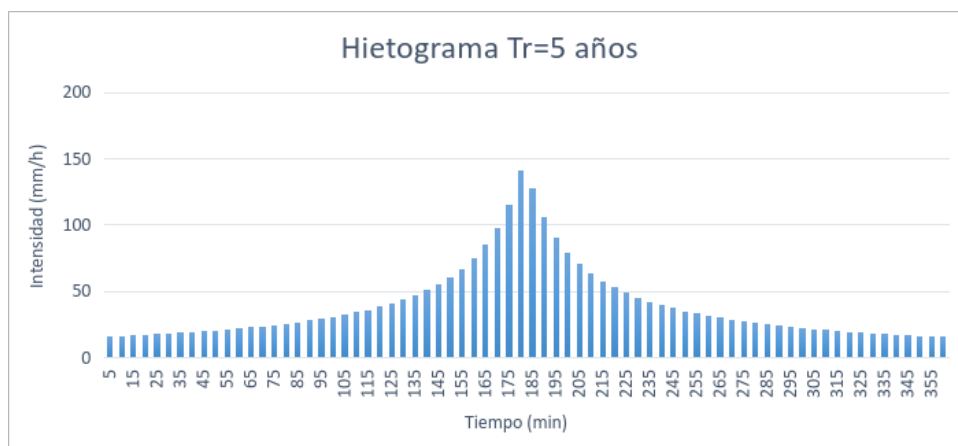


Figure 3.2. Hietograma para período de retorno de 5 años.

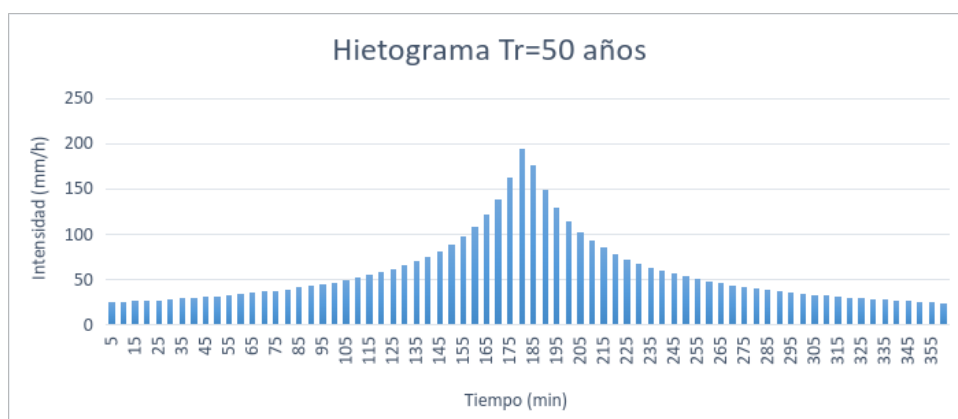


Figure 3.3. Hietograma para período de retorno de 50 años.

04 APLICACIÓN DE LOS SUDS EN LAS ZONAS DE ESTUDIO

Los SUDS son reconocidos como sistemas para la gestión alternativa del agua de escorrentía superficial, que permiten, mediante estrategias e infraestructura complementaria, reproducir, de la manera más aproximada posible, el ciclo hidrológico natural, mitigando así los efectos negativos que, tanto las variaciones de factores climatológicos como los procesos de urbanización, tienen sobre las características morfológicas de la cuenca y sobre el comportamiento hidrológico (Carrazana Ruiz, 2025). Partiendo de los diversos tipos de SUDS que existen y de un estudio de las zonas, se van a utilizar específicamente los techos verdes, los pavimentos permeables y los alcorques.

4.1. Definición de los escenarios de estudio

El análisis de los SUDS en el Malecón Tradicional se lleva a cabo mediante una evaluación exhaustiva del drenaje de sus aguas pluviales. Para esto se establecen y modelan diferentes propuestas, teniendo en cuenta el comportamiento de la red de drenaje actual, así como, la implementación de los SUDS. En la Tabla 4.1 se describen los escenarios de estudios utilizando 5 y 50 años de período de retorno de evento de lluvia, simulándose cuatro escenarios con tiempo de corrida de 8 horas para un hietograma de 6 horas, lo que permite evaluar el comportamiento del sistema en cuanto a los niveles de intensidad y frecuencia de precipitación.

Table 4.1. Descripción de los escenarios de estudio.

Escenarios	Descripción	Objetivos
1- Inundación pluvial para lluvias de un período de retorno de 5 años (drenaje dual)	Se desarrolla el escenario teniendo en cuenta la red de drenaje pluvial. (8 horas de corridas)	Ver cómo se comporta la red de drenaje pluvial en las zonas de estudio para las condiciones actuales
2- Inundación pluvial para lluvias de un período de retorno de 5 años (drenaje dual + SUDS)	Se desarrolla el escenario teniendo en cuenta la red de drenaje pluvial. (8 horas de corridas)	Ver cómo se comporta la red de drenaje pluvial en las zonas de estudio, con la implementación de los SUDS
3- Inundación pluvial para lluvias de un período de retorno de 50 años (drenaje dual)	Se desarrolla el escenario teniendo en cuenta la red de drenaje pluvial. (8 horas de corridas)	Ver cómo se comporta la red de drenaje pluvial en las zonas de estudio, para las condiciones actuales
4- Inundación pluvial para lluvias de un período de retorno de 50 años (drenaje dual + SUDS)	Se desarrolla el escenario teniendo en cuenta la red de drenaje pluvial. (8 horas de corridas)	Ver cómo se comporta la red de drenaje pluvial en las zonas de estudio, con la implementación de los SUDS

4.2. Puntos de observación

Para el análisis de los resultados de la simulación, se expresan en la Tabla 4.2 distintos puntos ubicados en las zonas de alto riesgo de inundación, según datos históricos, con el objetivo de analizar el comportamiento de red de drenaje existente y con la implementación de los SUDS.

Table 4.2. Localización de los puntos de observación.

Puntos	Localización de los puntos
1	Marina y Jovellar
2	Oquendo y Ánimas
3	Águila y Trocadero
4	Prado y Geníos

4.3. Análisis y comparación del comportamiento de la inundación en los puntos de observación

El resultado de la simulación se analiza en intervalos de 5 minutos para el tiempo de simulación planteado. En la figura 4.1, se puede ver cómo se comportan los calados en cada punto de observación para los diferentes escenarios.

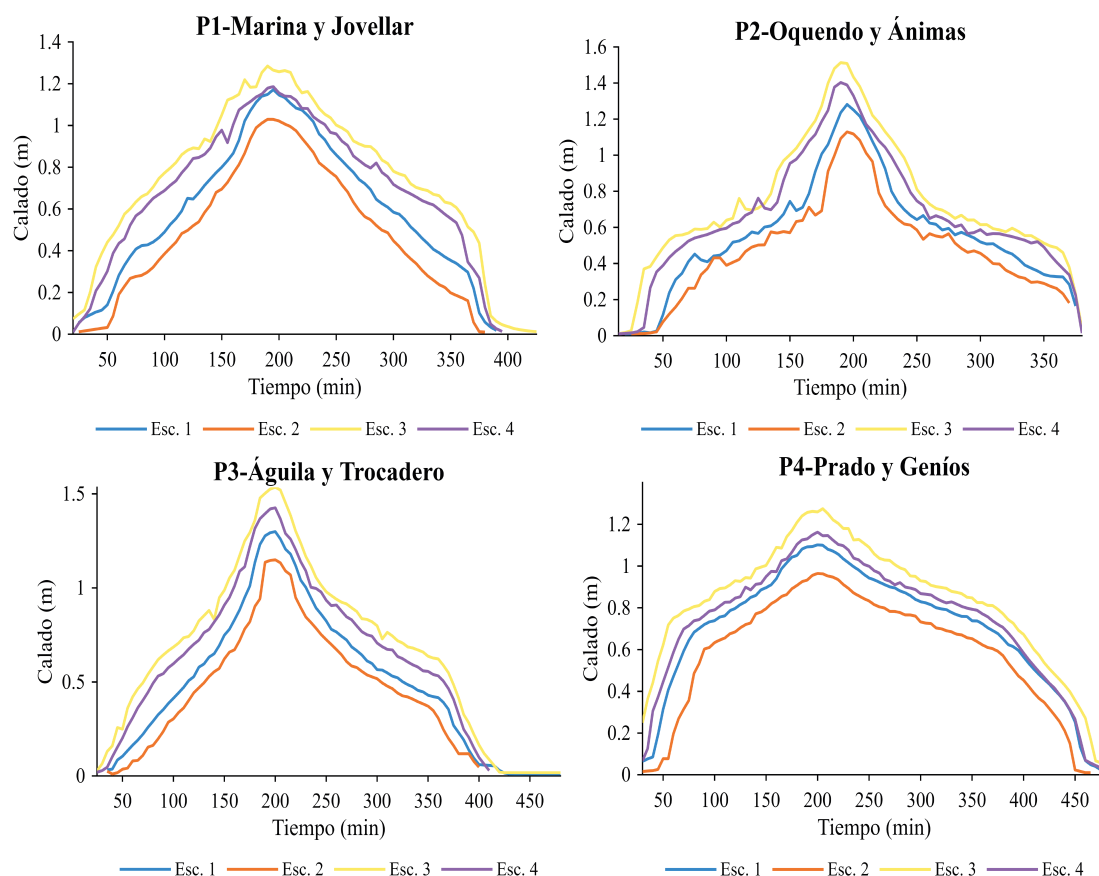


Figure 4.1. Gráficos de calado en cada punto de observación.

Se puede observar en cada punto que la diferencia entre los calados de los escenarios 3 y 4 es menor que la diferencia entre los calados de los escenarios 1 y 2, debido a que aumenta la lluvia para un período de retorno de 50 años con respecto a la de 5 años, pero la cantidad de SUDS sigue siendo la misma.

En la Tabla 4.3 se presentan los valores de máximos calados, los cuales ocurren entre los 190 y los 200 minutos, es decir entre las 3,17 y las 3,33 horas del comienzo de la lluvia, en todos los puntos de observación, lo que muestra un comportamiento uniforme del escurrimiento en toda la cuenca debido a la similitud de la topografía. Los puntos de mayor calado son P-2 (Oquendo y Ánimas) y el P-3 (Águila y Trocadero), siendo los de menor calado P-1 (Marina y Jovellar) y P-4 (Prado y Geníos).

4.4. Análisis y comparación del comportamiento de los caudales en los puntos de observación

En la figura 4.2 se pueden ver cómo se comportan los caudales en cada punto de observación para los diferentes escenarios simulados.

En la Tabla 4.4 se presentan los valores de máximos caudales, ocurriendo estos entre los 175 y los 205 minutos, es decir entre las 2,92 y 3,42 horas del comienzo de la lluvia. Los puntos de mayor caudal pico son P-1 (Marina y Jovellar) y P-2 (Oquendo y Ánimas). Los puntos de menor caudal pico son P-3 (Águila y Trocadero) y P-4 (Prado y Geníos).

Table 4.3. Máximos calados en los puntos de observación para cada escenario.

		Calados (m)			
Puntos	Tiempo (min)	Esc. 1	Esc. 2	Esc. 3	Esc. 4
1	190	1,1483	1,0294	1,2847	1,1787
	195	1,1716	1,0293	1,2646	1,1861
	200	1,1456	1,0213	1,2574	1,1557
2	190	1,2359	1,0927	1,5129	1,4027
	195	1,2813	1,1292	1,5084	1,3891
	200	1,2512	1,1180	1,4331	1,3298
3	190	1,2770	1,1365	1,5028	1,3945
	195	1,2934	1,1493	1,5254	1,4198
	200	1,2993	1,1460	1,5347	1,4259
4	190	1,0923	0,9333	1,2570	1,1303
	195	1,0937	0,9558	1,2617	1,1495
	200	1,1015	0,9646	1,2593	1,1625

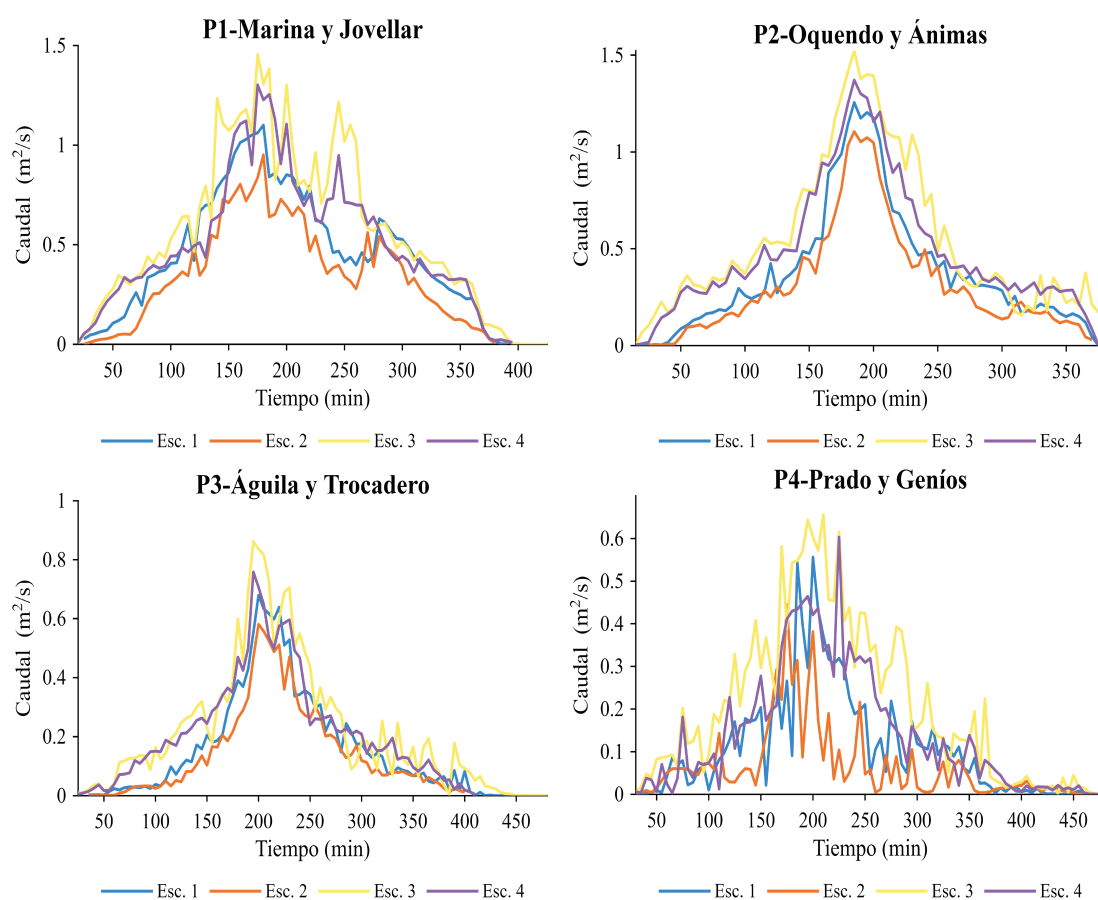
**Figure 4.2.** Gráficos de caudales en cada punto de observación.

Table 4.4. Máximos caudales en los puntos de observación para cada escenario.

Caudales (m ³ /s)					
Puntos	Tiempo (min)	Esc. 1	Esc. 2	Esc. 3	Esc. 4
1	175	1,0620	0,8373	1,4561	1,3027
	180	1,1004	0,9518	1,3057	1,2272
	185	0,8406	0,6392	1,3838	1,2546
2	185	1,2561	1,1056	1,5234	1,3714
	190	1,1743	1,0526	1,3778	1,3004
	195	1,2043	1,0740	1,3999	1,2787
3	195	0,5528	0,4676	0,8623	0,7589
	200	0,6793	0,5808	0,8363	0,7066
	205	0,6334	0,5572	0,8180	0,6491
4	195	0,2962	0,2494	0,6441	0,4642
	200	0,5564	0,3817	0,6037	0,4210
	205	0,4320	0,1736	0,5720	0,4365

Se puede apreciar que los máximos calados ocurren a la misma hora o hasta 15 minutos después de generarse los máximos caudales, por tanto, hasta que no se producen los caudales picos no llega a ocurrir la máxima inundación.

La zona de estudio se encuentra totalmente urbanizada con pocos espacios libres sin pavimentar y desde el punto de vista estructural, las edificaciones no cuentan en su totalidad con un óptimo estado técnico, por lo que no se puede utilizar el 100 % de todos los espacios para implementar los SUDS. Por tanto, la reducción de los valores picos de inundación del escenario 1 con respecto al escenario 2, se encuentran entre el 11 y el 13 % y en el caso del escenario 3 con respecto al escenario 4, se encuentran entre el 7 y el 8 %. En el caso de los caudales, la reducción de los valores picos del escenario 1 con respecto al escenario 2, se encuentra entre el 32 y el 12 % y en el caso del escenario 3 con respecto al 4 se encuentra entre el 28 y el 10 %.

4.5. Análisis y comparación de la red de drenaje pluvial

El análisis de la red de drenaje pluvial se hace en los registros correspondientes a cada punto de observación y en todos los escenarios de estudios planteados. La Tabla 4.5 muestra el nodo correspondiente a cada punto.

Table 4.5. Localización de los nodos.

Nodos	Localización de los nodos
RG11_C13	Marina y Jovellar
RG40_C13	Oquendo y Ánimas
RG13_C17	Águila y Trocadero
RG35_C18	Prado y Geníos

A continuación se presenta el comportamiento temporal de la inundación en cada registro para cada uno de los escenarios de estudio y el perfil longitudinal correspondiente al tramo donde se localizan los registros, representado en el instante en que se alcanza el pico de inundación.

En la figura 4.3 se puede observar el comportamiento de la inundación en el registro RG11_C13 que corresponde a Marina y Jovellar. En este registro se presentan caudales picos desde la red a la superficie, entre 5,2 m³/s y 10,5 m³/s con un tiempo de duración de 3,50 horas para el escenario 1 y entre 6,3 m³/s y 15,2 m³/s con un tiempo de duración de 3 horas para el escenario 2.

En la figura 4.4 se puede observar el comportamiento de la inundación en el registro RG11_C13 que corresponde a Marina y Jovellar. En este registro se presentan caudales picos desde la red a la superficie, entre 5 m³/s y 17,7

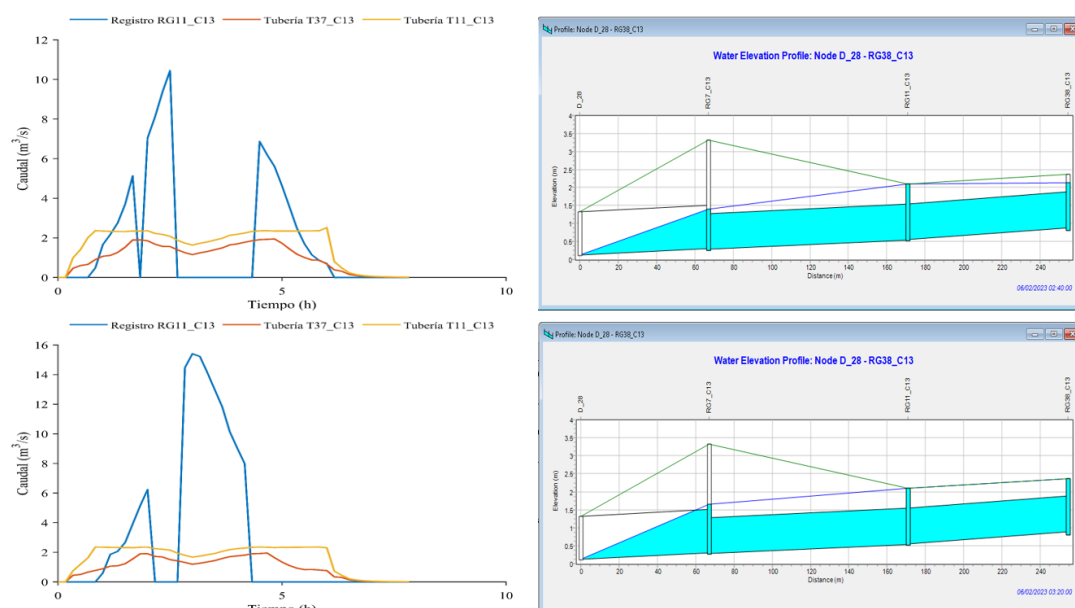


Figure 4.3. Comportamiento del nivel de inundación en el nodo RG11_C13 (escenario 1 y 2).

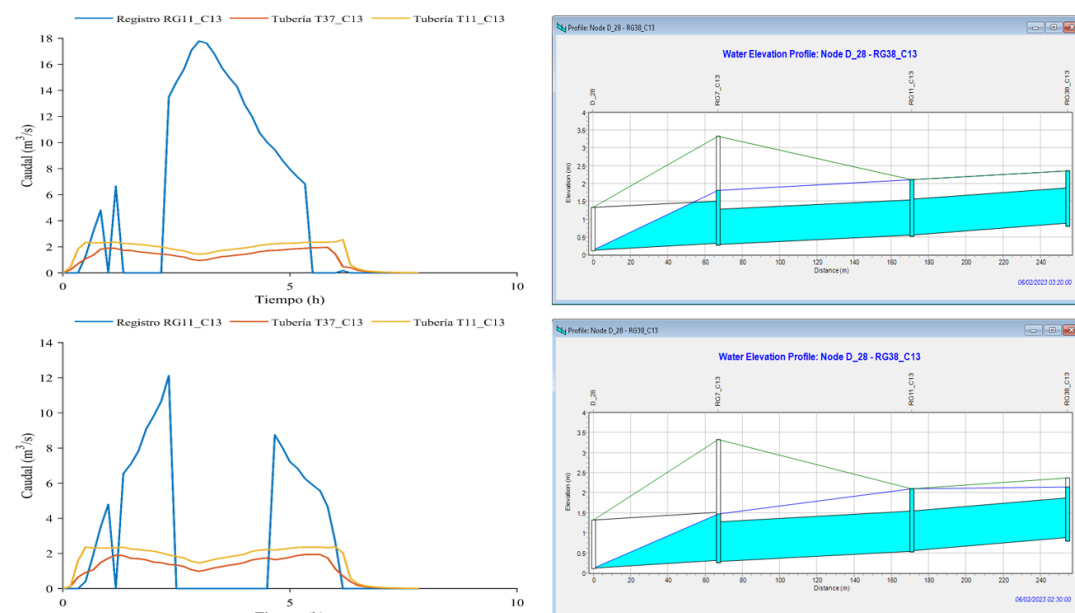


Figure 4.4. Comportamiento del nivel de inundación en el nodo RG11_C13 (escenario 3 y 4).

m^3/s y un tiempo de duración de 4,20 horas para el escenario 3 y entre $4,9 \text{ m}^3/\text{s}$ y $12,2 \text{ m}^3/\text{s}$ con un tiempo de duración de 3,50 horas para el escenario 4.

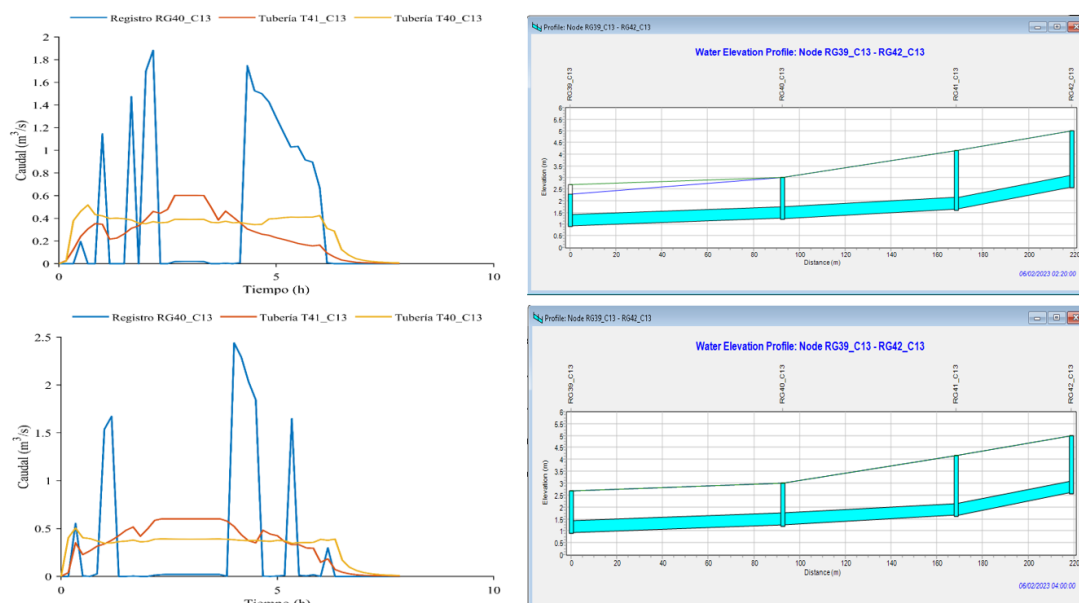


Figure 4.5. Comportamiento del nivel de inundación en el nodo RG40_C13 (escenario 1 y 2).

En la figura 4.5 se puede observar el comportamiento de la inundación en el registro RG40_C13 que corresponde a Oquendo y Ánimas. En este registro se presentan caudales picos desde la red a la superficie, entre $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ y $1,9 \text{ m}^3/\text{s}$ con un tiempo de duración de 3,30 horas para el escenario 1 y entre $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$ y $2,4 \text{ m}^3/\text{s}$ con un tiempo de duración de 2,30 horas para el escenario 2.

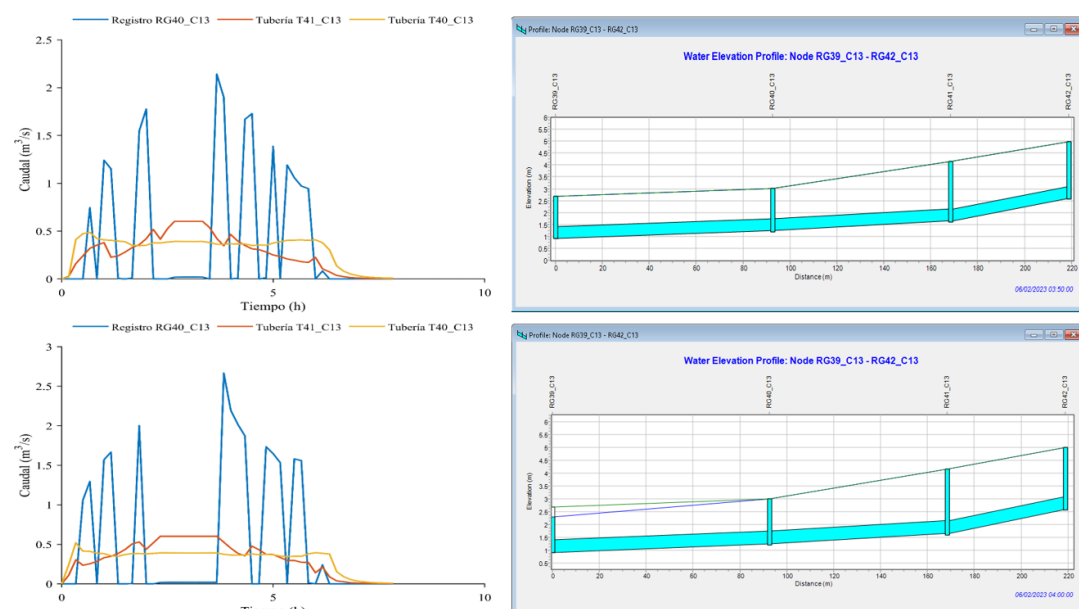


Figure 4.6. Comportamiento del nivel de inundación en el nodo RG40_C13 (escenario 3 y 4).

En la figura 4.6 se puede observar el comportamiento de la inundación en el registro RG40_C13 que corresponde a Oquendo y Ánimas. En este registro se presentan caudales picos desde la red a la superficie, entre $0,06 \text{ m}^3/\text{s}$ y $2,2 \text{ m}^3/\text{s}$ con un tiempo de duración de 4 horas para el escenario 3 y entre $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ y $2,7 \text{ m}^3/\text{s}$ con un tiempo

de duración de 3,30 horas para el escenario 4.

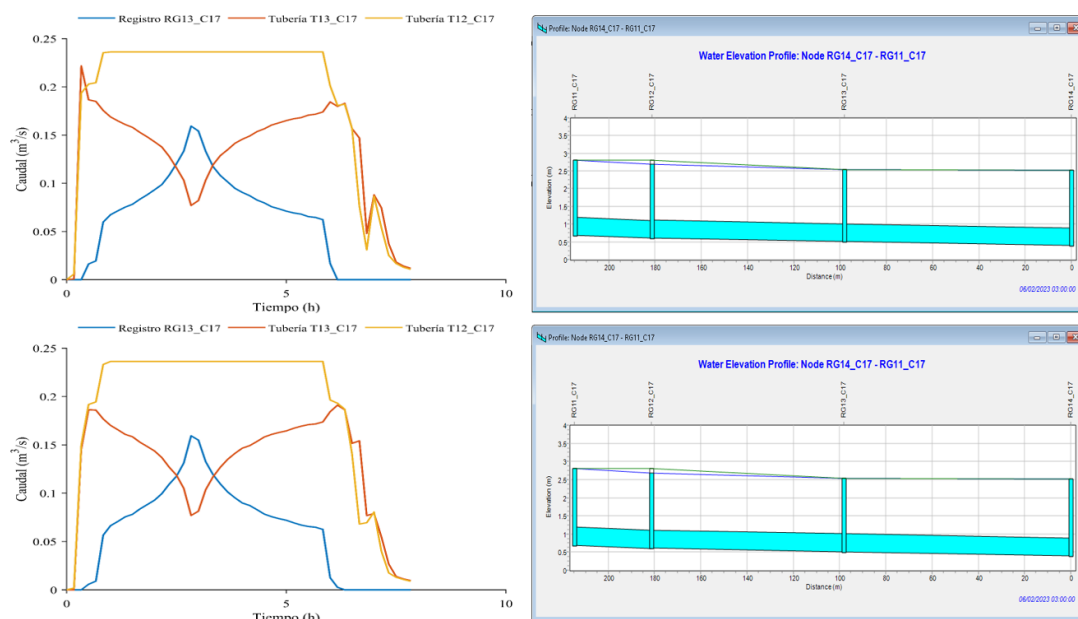


Figure 4.7. Comportamiento del nivel de inundación en el nodo RG13_C17 (escenario 1 y 2).

En la figura 4.7 se puede observar el comportamiento de la inundación en el registro RG13_C17 que corresponde a Águila y Trocadero. En este registro se presentan caudales picos desde la red a la superficie, de $0,17 \text{ m}^3/\text{s}$ con un tiempo de duración de 5,50 horas para el escenario 1 y $0,16 \text{ m}^3/\text{s}$ con un tiempo de duración de 5,50 horas y para el escenario 2.

En la figura 4.8 se puede observar el comportamiento de la inundación en el registro RG13_C17 que corresponde a Águila y Trocadero. En este registro se presentan caudales picos desde la red a la superficie, entre $0,14 \text{ m}^3/\text{s}$ y $0,17 \text{ m}^3/\text{s}$ con un tiempo de duración de 6,10 horas para el escenario 3 y de $0,17 \text{ m}^3/\text{s}$ y un tiempo de duración de 6 horas para el escenario 4.

En la figura 4.9 se puede observar el comportamiento de la inundación en el registro RG35_C18 que corresponde a Prado y Genios. En este registro se presentan caudales picos desde la red a la superficie, entre $0,35 \text{ m}^3/\text{s}$ y $0,85 \text{ m}^3/\text{s}$ con un tiempo de duración de 6,50 horas para el escenario 1 y entre $0,15 \text{ m}^3/\text{s}$ y $0,4 \text{ m}^3/\text{s}$ con un tiempo de duración de 6,30 horas para el escenario 2.

En la figura 4.10 se puede observar el comportamiento de la inundación en el registro RG35_C18 que corresponde a Prado y Genios. En este registro se presentan caudales picos desde la red a la superficie, entre $0,4 \text{ m}^3/\text{s}$ y $1,04 \text{ m}^3/\text{s}$ y un tiempo de duración de 7,40 horas para el escenario 3 y entre $0,45 \text{ m}^3/\text{s}$ y $0,83 \text{ m}^3/\text{s}$ con un tiempo de duración de 7,20 horas para el escenario 4.

05 CONCLUSIONES

Se puede observar que debido al aumento de la urbanización el sistema de drenaje pluvial urbano diseñado es insuficiente para evacuar el volumen de escorrentía generado por las precipitaciones.

La simulación numérica con Iber-SWMM permite realizar una mejor comparación de los escenarios de estudio, ya que permite realizar el cálculo de flujo en la superficie y en la red durante episodios de lluvia.

Partiendo de los cuatro puntos de observación estudiados, la cota de máxima inundación ocurre en Águila y Trocadero con un valor de 1,30 m para 5 años y 1,53 m para 50 años de período de retorno.

Se comprueba que al implementar los SUDS se reducen tanto los picos de inundación como los tiempos de inundación.

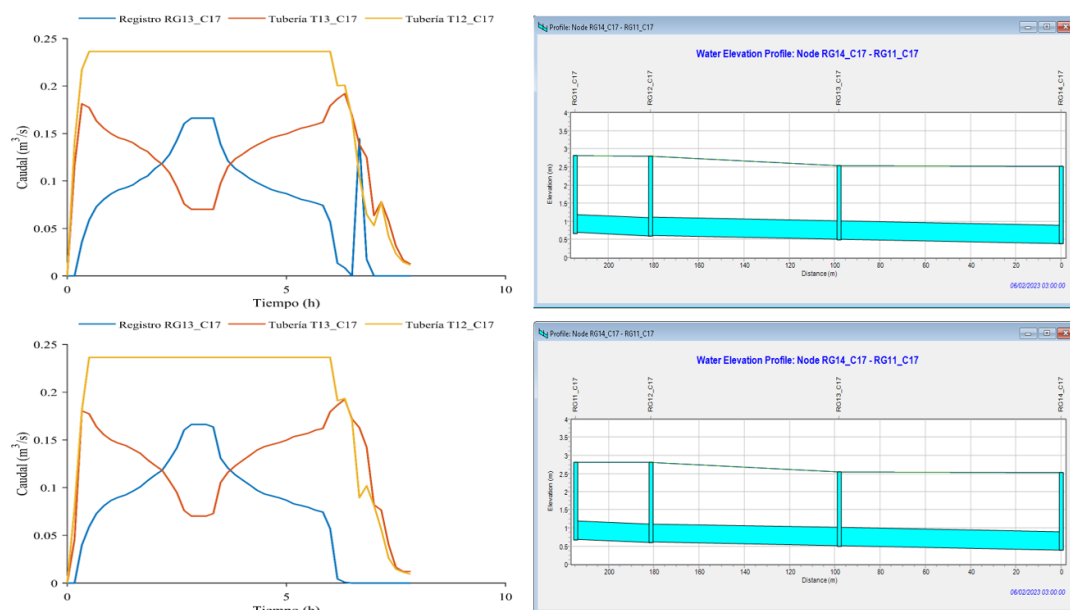


Figure 4.8. Comportamiento del nivel de inundación en el nodo RG13_C17 (escenario 3 y 4).

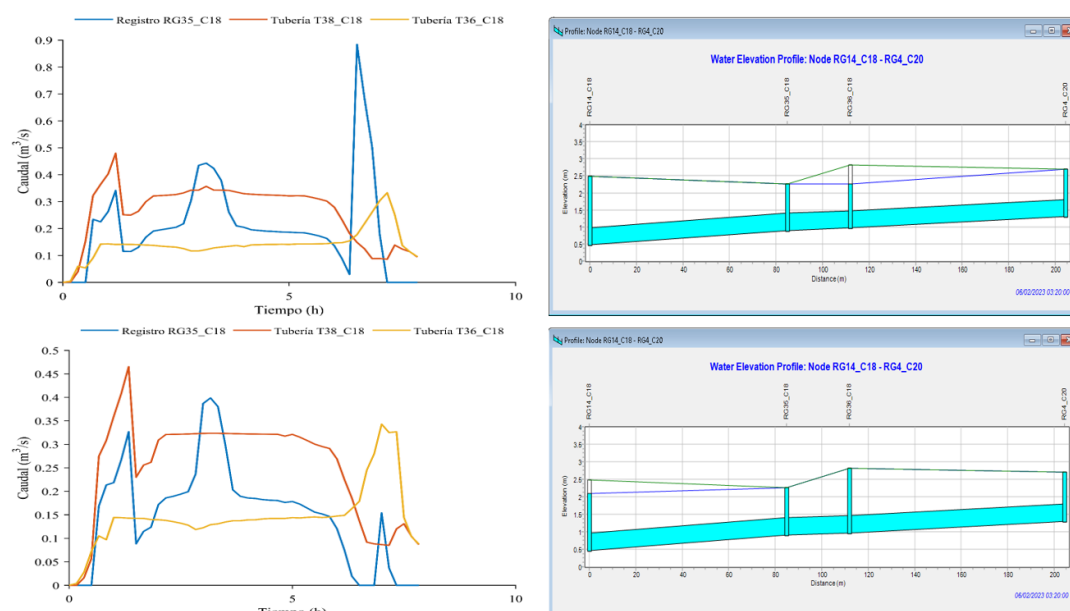


Figure 4.9. Comportamiento del nivel de inundación en el nodo RG35_C18 (escenario 1 y 2).

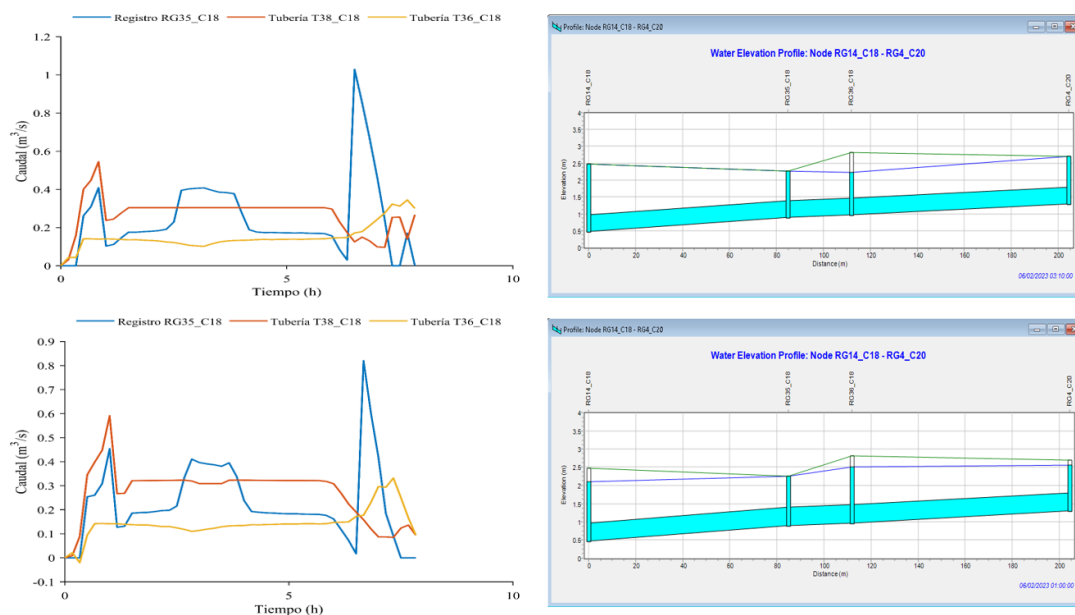


Figure 4.10. Comportamiento del nivel de inundación en el nodo RG35_C18 (escenario 3 y 4).

06 REFERENCIAS

- Carrazana Ruiz, A.** (2025). Simulación numérica de sistemas de drenaje basados en la naturaleza. malecón de la habana.
- Córdova López, L.** (2020). Malecón tradicional de la habana. parte i: Análisis de las causas de la inundación costera. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 41(3), 25–39.
- Pérez Hurtado, O. F.** (2020). Sistemas urbanos de drenaje sostenible.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

ORCID de los autores

Jidel Antonio Del Sol Díaz <https://orcid.org/0009-0004-8351-4724>
 Bryan Pérez León <https://orcid.org/0009-0000-5820-5234>
 Patricia Ruth de Horta Brito <https://orcid.org/0000-0001-6502-8205>

Metodología estructurada para el diseño de sistemas de riego agrícola mediante energía fotovoltaica

Samantha Lazara Cáceres Fuente

E-MAIL:

Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”. La Habana, Cuba.

Daniela Córdova de HortaE-MAIL: danielitach096@gmail.com

Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”. La Habana, Cuba.

RESUMEN

La creciente demanda hídrica y energética en la agricultura ha impulsado el desarrollo de sistemas de riego alimentados mediante energía solar fotovoltaica como alternativa sostenible y eficiente. El presente trabajo propone una metodología integrada para el diseño de sistemas de riego por aspersión, basada en la articulación de variables agronómicas, hidráulicas y energéticas. La metodología se estructura en etapas secuenciales que incluyen la caracterización física y climática, la determinación de los requerimientos hídricos, el diseño y modelación hidráulica de la red, el dimensionamiento del sistema de bombeo y el diseño energético fotovoltaico. El enfoque metodológico incorpora herramientas de simulación y criterios de eficiencia orientados a garantizar estabilidad hidráulica, uniformidad de riego y compatibilidad energética. Como resultado, se establece una metodología técnicamente estructurada para el desarrollo de sistemas de riego energéticamente autosuficientes y ambientalmente sostenibles.

PALABRAS CLAVE: *riego agrícola, energía fotovoltaica, modelación hidráulica, diseño integrado, sostenibilidad*

Structured methodology for the design of agricultural irrigation systems using photovoltaic energy

ABSTRACT

The growing demand for water and energy in agriculture has driven the development of photovoltaic solar-powered irrigation systems as a sustainable and efficient alternative. This paper proposes an integrated methodology for the design of sprinkler irrigation systems, based on the integration of agronomic, hydraulic, and energy variables. The methodology is structured in sequential stages that include physical and climatic characterization, determination of water requirements, hydraulic network design and modeling, pump system sizing, and photovoltaic energy design. The methodological approach incorporates simulation tools and efficiency criteria aimed at ensuring hydraulic stability, irrigation uniformity, and energy compatibility. As a result, a technically structured methodology is established for the development of energy-self-sufficient and environmentally sustainable irrigation systems.

KEYWORDS: *agricultural irrigation, photovoltaics, hydraulic modeling, integrated design, sustainability*

01 INTRODUCCIÓN

La agricultura constituye una de las actividades de mayor consumo hídrico y energético a escala mundial (Barrueto Guzmán et al., 2018). El incremento sostenido de la demanda alimentaria, unido al agotamiento progresivo de los combustibles fósiles y al incremento de los costos energéticos, ha favorecido el desarrollo de

tecnologías orientadas a mejorar la eficiencia de los sistemas de producción agrícola (Gevorkov et al., 2023; Habib et al., 2023).

Dentro de estas tecnologías, los sistemas de riego presurizado alimentados mediante energía solar fotovoltaica han adquirido una importancia creciente debido a su capacidad para reducir costos operacionales, disminuir emisiones contaminantes y favorecer la autosuficiencia energética en zonas agrícolas (Bawa et al., 2025; Mérida García et al., 2018). La utilización de energía solar aplicada al bombeo de agua resulta particularmente favorable en sistemas de riego por aspersión, debido a la coincidencia temporal entre los períodos de mayor radiación solar y las mayores demandas hídricas de los cultivos.

No obstante, el diseño de este tipo de instalaciones constituye un problema multidisciplinario que involucra simultáneamente variables agronómicas, hidráulicas y energéticas (Navarro-González et al., 2023). En numerosos casos, los procedimientos de diseño se desarrollan de manera independiente, provocando incompatibilidades entre la demanda hidráulica del sistema de riego y la capacidad energética disponible en el sistema fotovoltaico (Hassan et al., 2024). Asimismo, las pérdidas de carga en las redes presurizadas, las variaciones de presión y la fluctuación de la radiación solar introducen limitaciones operativas que afectan la estabilidad y eficiencia del sistema (Gutierrez et al., 2021).

Resulta necesaria la implementación de metodologías integrales que permitan desarrollar el diseño de sistemas de riego desde un enfoque sistémico, incorporando herramientas de simulación hidráulica y criterios de eficiencia energética capaces de garantizar estabilidad operacional, sostenibilidad técnica y racionalidad energética.

El presente trabajo propone una metodología integrada para el diseño de sistemas de riego por aspersión alimentados mediante energía solar fotovoltaica, estructurada en etapas metodológicas secuenciales que permiten articular de manera lógica y progresiva las diferentes fases del diseño agronómico, hidráulico y energético del sistema.

02 MARCO METODOLÓGICO

2.1. Estructura general de la metodología

La metodología propuesta para el diseño de sistemas de riego por aspersión alimentados mediante energía solar fotovoltaica se fundamenta en un enfoque integrado que articula de manera secuencial los componentes agronómicos, hidráulicos y energéticos del sistema. Esta metodología se estructura en seis bloques principales que representan las etapas fundamentales del proceso de diseño.

El primer bloque corresponde a la caracterización integral de las condiciones físicas y climáticas del área de estudio, considerando variables topográficas, edáficas y climáticas que condicionan el comportamiento del sistema. El segundo bloque se orienta a la determinación de los requerimientos hídricos del cultivo, estableciendo parámetros como la evapotranspiración, la lámina de riego, la frecuencia de aplicación y el caudal de diseño.

El tercer bloque abarca el diseño hidráulico de la red de riego y su modelación computacional, mediante la evaluación de caudales, presiones, velocidades y pérdidas de carga. El cuarto bloque corresponde al dimensionamiento del sistema de bombeo, a partir de la demanda hidráulica y las condiciones operacionales del sistema. El quinto bloque se enfoca en el diseño del sistema fotovoltaico, considerando la demanda energética y la disponibilidad de radiación solar para la selección de sus componentes principales. Finalmente, el sexto bloque integra la evaluación global del sistema, analizando su desempeño hidráulico y energético, así como su eficiencia y sostenibilidad (Fig. 2.1).

Esta estructura permite desarrollar un procedimiento sistemático de diseño, integrando de forma coherente las diferentes etapas del sistema y garantizando la compatibilidad entre la demanda hídrica, la respuesta hidráulica y la capacidad energética disponible.

2.2. Caracterización del área de estudio

El primer bloque de la metodología corresponde a la caracterización integral del área de estudio. Para ello se analizan las condiciones físicas, climáticas, edáficas e hidrológicas que influyen directamente en el comportamiento operacional del sistema y en la determinación de la demanda hídrica del cultivo.

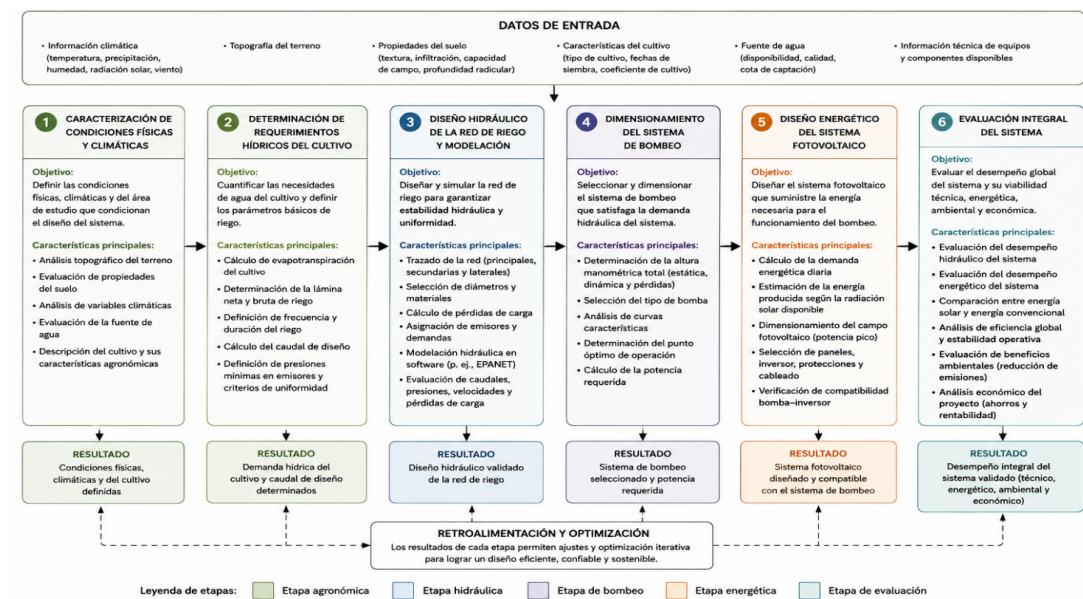


Figure 2.1. Esquema de la metodología integrada para el diseño de sistemas de riego por aspersión alimentados con energía solar fotovoltaica.

Para la caracterización topográfica del terreno se emplean modelos digitales del terreno (MDT), curvas de nivel y levantamientos topográficos, permitiendo evaluar pendientes, cotas, desniveles y geometría del área agrícola. Se utilizan herramientas CAD y estaciones topográficas que facilitan la generación de superficies TIN, perfiles longitudinales y representación espacial de la red hidráulica. Este análisis resulta fundamental para determinar la distribución de presiones, las pérdidas de carga y el comportamiento hidráulico de las tuberías y emisores dentro del sistema de riego.

La caracterización física del suelo comprende el análisis de propiedades hidráulicas y mecánicas relevantes para el manejo del agua en el perfil radicular. Se evalúan parámetros como densidad aparente, capacidad de infiltración, retención de humedad y profundidad efectiva de raíces. Asimismo, se consideran análisis granulométricos para determinar la proporción de arenas, limos y arcillas presentes en el suelo, permitiendo clasificar su comportamiento hidráulico y estimar su capacidad de almacenamiento de agua (Mesele et al., 2024). Se realizan ensayos de infiltración in situ y análisis edafológicos orientados a determinar la velocidad máxima de absorción del agua, evitando pérdidas por escorrentía superficial y favoreciendo la uniformidad del riego (Vishwakarma et al., 2025).

La evaluación climática incorpora variables meteorológicas fundamentales para la estimación de la evapotranspiración y los requerimientos hídricos del cultivo. Los datos son obtenidos mediante registros de estaciones meteorológicas, pluviómetros y bases climáticas locales, incluyendo temperatura del aire, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, precipitación y radiación solar incidente. A partir de estos registros se elaboran hietogramas, series temporales de precipitación y análisis de variación horaria y diaria de la radiación solar, herramientas que permiten caracterizar el comportamiento climático del área y establecer las condiciones reales de operación del sistema de riego (Cauteruccio & Lanza, 2023).

La precipitación es analizada mediante registros pluviométricos históricos, permitiendo evaluar la distribución temporal de las lluvias, la ocurrencia de eventos extremos y la disponibilidad natural de agua para el cultivo. Por su parte, la radiación solar se estudia a través de curvas de variación horaria y diaria, fundamentales para el posterior dimensionamiento energético del sistema fotovoltaico y la determinación de las horas solares picos disponibles en el sitio.

La metodología considera además el análisis hidrológico e hidráulico de la fuente de abasto de agua, evaluando disponibilidad hídrica, condiciones de captación, variaciones de caudal y características del suministro. Para ello pueden emplearse hidrogramas y registros de comportamiento hidráulico que permiten verificar la compatibilidad

entre la oferta de agua y la demanda requerida por el sistema de riego.

2.3. Determinación de los requerimientos hídricos del cultivo

En esta fase metodológica se determinan los requerimientos hídricos del cultivo y se establecen los parámetros hidráulicos fundamentales para el diseño del sistema de riego. El procedimiento se basa en métodos agrometeorológicos que integran variables climáticas, características del cultivo y propiedades físicas del suelo, permitiendo estimar con precisión la demanda de agua bajo diferentes condiciones de operación.

La estimación de la demanda hídrica se realiza a partir de la evapotranspiración de referencia (ET_o), calculada mediante información meteorológica obtenida de estaciones climáticas y registros pluviométricos. Para ello se consideran variables como temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento, precipitación y radiación solar, las cuales permiten representar el comportamiento atmosférico y las condiciones reales de evaporación y transpiración del cultivo.

La evapotranspiración del cultivo (ET_c) se determina mediante la incorporación del coeficiente de cultivo (K_c), el cual varía según las etapas fenológicas y el grado de desarrollo vegetativo de la plantación. Este coeficiente permite representar las variaciones temporales del consumo de agua durante el ciclo agrícola y constituye un parámetro esencial para evitar tanto el déficit hídrico como el sobredimensionamiento del sistema (Carrión et al., 2001; Martín-Benito, 1991). La relación utilizada se expresa en la ecuación (2.1):

$$ET_c = K_c \cdot ET_o \quad (2.1)$$

Donde: ET_c es la evapotranspiración del cultivo (mm/día); K_c es el coeficiente del cultivo (adimensional); y ET_o es la evapotranspiración de referencia (mm/día).

A partir de la evapotranspiración del cultivo se determina la lámina neta de riego, considerando el intervalo de aplicación y la capacidad de almacenamiento hídrico del suelo. Este análisis permite establecer la cantidad de agua necesaria para reponer el déficit acumulado en el perfil radicular, manteniendo condiciones adecuadas de humedad para el desarrollo del cultivo y evitando pérdidas por percolación profunda o escorrentía superficial.

La metodología incorpora además criterios asociados a eficiencia de aplicación y uniformidad de distribución del agua, elementos fundamentales para garantizar el funcionamiento hidráulico adecuado del sistema de riego por aspersión. Se evalúan parámetros relacionados con infiltración, velocidad de aplicación y capacidad de absorción del suelo, verificando que la intensidad de precipitación de los aspersores sea inferior a la velocidad máxima de infiltración del terreno. Este criterio permite reducir pérdidas por escurrimiento superficial y mejorar el aprovechamiento del recurso hídrico.

Durante esta etapa también se definen las condiciones operacionales de los emisores hidráulicos, incluyendo presión mínima de funcionamiento, espaciamiento entre aspersores, caudal unitario y uniformidad de descarga. Estas variables son esenciales para asegurar una aplicación homogénea del agua en toda el área irrigada y mantener estabilidad hidráulica dentro de la red. Asimismo, se establece la organización funcional de los laterales de riego y la simultaneidad de operación de los sectores hidráulicos.

El caudal de diseño del sistema se determina a partir del número de laterales que operan simultáneamente y del caudal requerido por cada lateral, empleando la ecuación (2.2):

$$Q_d = q \cdot A \quad (2.2)$$

Donde: Q_d es el caudal de diseño del sistema (l/s); q es el hidromódulo de riego (l/s/ha); y A es el área total a regar (ha).

Se considera el cálculo del hidromódulo de riego y del caudal total requerido por el sistema, parámetros que permiten definir el dimensionamiento hidráulico de tuberías, válvulas, emisores y equipos de bombeo. Estos cálculos constituyen la base para la posterior modelación hidráulica en programas especializados como EPANET, donde se analizan presiones, velocidades, pérdidas de carga y comportamiento operativo de la red.

2.4. Diseño hidráulico de la red de riego

El tercer bloque metodológico corresponde al diseño hidráulico de la red de distribución de agua, etapa en la cual se define la configuración estructural y funcional del sistema de riego, integrando tuberías principales, secundarias y laterales, así como elementos de control como válvulas, hidrantes y emisores. Esta fase determina el comportamiento hidráulico global del sistema y su eficiencia operativa.

El diseño hidráulico se basa en el análisis del flujo en conducciones presurizadas, considerando variables como caudal, velocidad, presión y pérdidas de energía. Estos parámetros permiten asegurar una distribución uniforme del agua y garantizar condiciones de operación adecuadas en cada punto de emisión, evitando variaciones que puedan comprometer la uniformidad del riego.

Uno de los aspectos fundamentales en esta etapa es la determinación de las pérdidas de carga, las cuales se calculan a partir de relaciones derivadas de la mecánica de fluidos. Estas pérdidas dependen de la longitud de las tuberías, el diámetro interno, la rugosidad del material y la velocidad del flujo. Para su estimación se emplea la ecuación de Darcy-Weisbach (2.3):

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (2.3)$$

Donde: h_f es la pérdida de carga total por fricción (m); f es el factor de fricción de Darcy (adimensional); L es la longitud de tubería (m); D es el diámetro interno de la tubería (m); V es la velocidad del flujo (m/s); y g es la aceleración de la gravedad (m/s^2).

El análisis hidráulico incluye además la verificación de velocidades permisibles dentro de las conducciones, con el objetivo de evitar sedimentación en el caso de bajas velocidades o erosión interna en el caso de velocidades elevadas. Asimismo, se evalúa la distribución de presiones en toda la red, asegurando que los emisores operen dentro de rangos óptimos de funcionamiento y mantengan una descarga uniforme.

Para la selección de diámetros comerciales de tuberías se consideran criterios de eficiencia hidráulica y optimización económica. Este proceso busca minimizar pérdidas de energía, reducir costos de instalación y garantizar un adecuado equilibrio entre capacidad de conducción y consumo energético del sistema de bombeo.

El diseño contempla la organización espacial de la red hidráulica, definiendo la disposición de los sectores de riego y la simultaneidad de operación de los distintos ramales. Esta configuración permite controlar el caudal demandado en cada etapa de funcionamiento y facilita la regulación de presiones mediante válvulas de control y dispositivos de regulación.

2.5. Modelación y simulación hidráulica

Una vez definida la configuración hidráulica de la red, se desarrolla la etapa correspondiente a la modelación y simulación computacional del sistema, cuyo propósito es representar el comportamiento hidráulico de la instalación bajo diferentes condiciones operacionales y verificar el cumplimiento de los criterios de diseño previamente establecidos. Esta fase permite validar técnicamente el funcionamiento de la red antes de su implementación física, reduciendo incertidumbres asociadas al desempeño hidráulico y energético del sistema de riego.

La modelación computacional se desarrolla mediante herramientas especializadas de análisis hidráulico, como EPANET, las cuales permiten simular el comportamiento del flujo en conducciones presurizadas considerando condiciones reales de operación. A través de estos modelos se evalúan variables fundamentales como caudales, velocidades de circulación y pérdidas de carga (Rossman, 2001). También es posible generar perfiles de presión que representan el comportamiento hidráulico del sistema, permitiendo analizar la variación de las presiones a lo largo de la red y evaluar su desempeño bajo condiciones reales de operación como se muestra en la figura 2.2. El procedimiento de simulación incorpora la representación estructural de todos los componentes hidráulicos del sistema, incluyendo tuberías principales, secundarias y laterales, así como válvulas, nodos de consumo, hidrantes y emisores (Fig. 2.3). Cada elemento es caracterizado mediante parámetros hidráulicos específicos relacionados con diámetro, longitud, rugosidad, elevación topográfica y demanda de caudal, permitiendo obtener una representación precisa del comportamiento operativo de la red.

Se identifican las condiciones críticas de funcionamiento, especialmente en los puntos más desfavorables de la

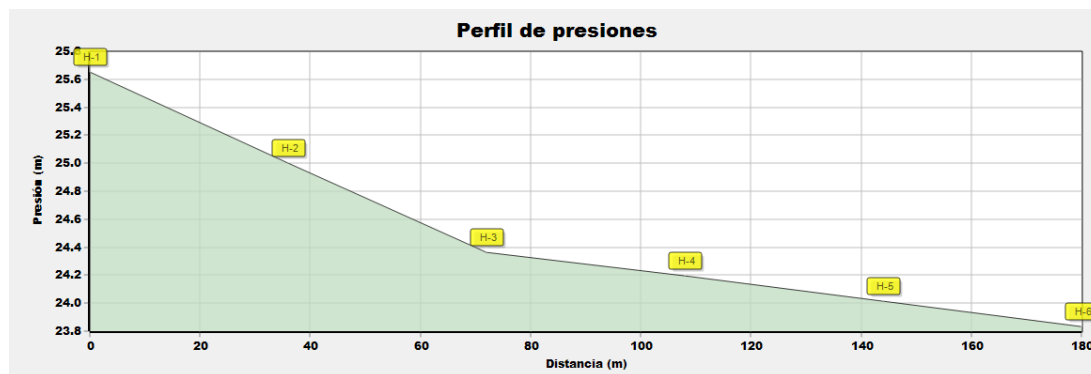


Figure 2.2. Perfil de presiones, EPANET.

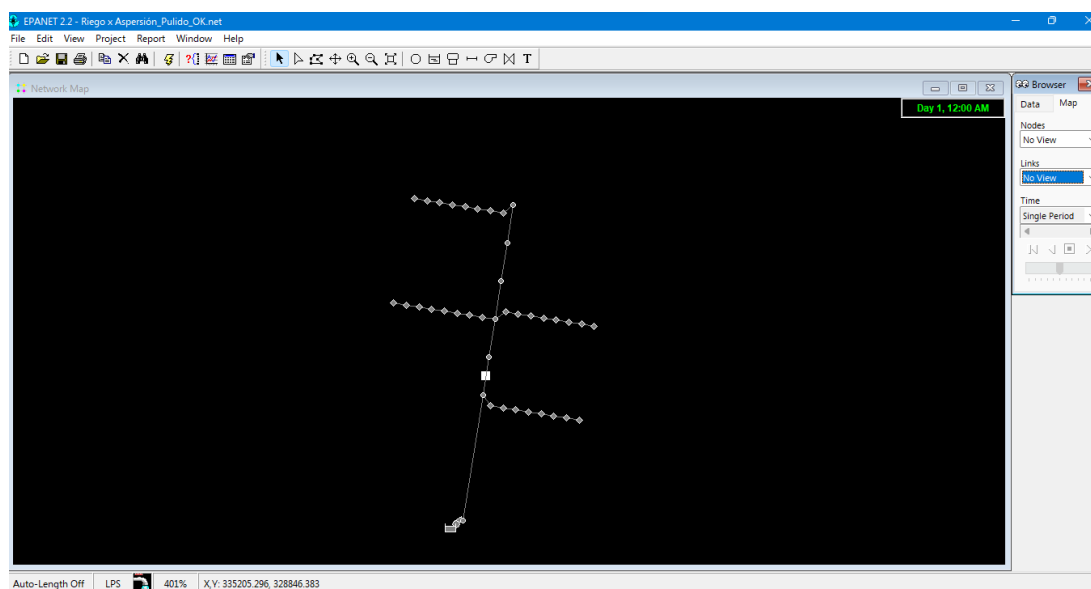


Figure 2.3. Representación estructural de todos los componentes hidráulicos del sistema de riego en EPANET.

instalación, donde pueden presentarse reducciones significativas de presión o variaciones de caudal que afecten la uniformidad del riego. En particular, se analizan los laterales extremos de la red, debido a que suelen presentar las mayores pérdidas de carga y las condiciones hidráulicas más restrictivas.

La modelación facilita la evaluación de la estabilidad hidráulica del sistema frente a distintos escenarios operacionales, permitiendo verificar el comportamiento de la red durante variaciones de demanda, cambios en simultaneidad de operación o modificaciones en las condiciones de suministro de agua. Este análisis resulta fundamental para garantizar un funcionamiento continuo, estable y energéticamente eficiente.

La metodología incorpora además procesos iterativos de optimización hidráulica, en los cuales se ajustan diámetros de tuberías, configuraciones de conducción y condiciones de operación hasta alcanzar valores adecuados de presión y velocidad dentro de toda la red. Estas simulaciones permiten reducir pérdidas energéticas, optimizar el consumo de potencia del sistema de bombeo y mejorar la uniformidad de distribución del agua en los emisores.

2.6. Dimensionamiento del sistema de bombeo

La siguiente etapa metodológica corresponde al dimensionamiento del sistema de bombeo, encargado de suministrar la energía hidráulica necesaria para garantizar el funcionamiento adecuado de la red de riego presurizada. Esta fase constituye el vínculo entre el diseño hidráulico y el sistema energético, debido a que define las condiciones de operación requeridas para transportar el agua desde la fuente de abastecimiento hasta los emisores con la presión y caudal adecuados.

Para la selección del equipo de bombeo se consideran parámetros hidráulicos como el caudal de diseño del sistema, la altura manométrica total, las pérdidas de carga por fricción y las diferencias de elevación presentes en la red. Estos elementos permiten determinar las condiciones reales de operación a las que estará sometido el equipo durante el funcionamiento del sistema de riego.

La altura manométrica total se determina a partir de la suma de las cargas estáticas y dinámicas presentes en la instalación, incorporando las pérdidas hidráulicas generadas en tuberías, accesorios, válvulas y emisores. Este parámetro constituye uno de los criterios principales para la selección de la bomba, ya que define la energía necesaria para garantizar el suministro uniforme de agua en toda la red hidráulica.

La metodología incorpora el análisis de las curvas características de funcionamiento de las bombas, permitiendo identificar el punto óptimo de operación mediante la intersección entre la curva del sistema y la curva característica del equipo. Este análisis resulta esencial para garantizar condiciones de trabajo estables, evitar sobrecargas hidráulicas y maximizar el rendimiento energético de la instalación (Fig. 2.4).

Durante el proceso de selección de la bomba se consideran criterios asociados a eficiencia hidráulica, estabilidad operacional y compatibilidad entre las condiciones hidráulicas del sistema y las prestaciones técnicas del equipo de bombeo. Asimismo, se evalúan aspectos relacionados con la continuidad operativa, confiabilidad mecánica y capacidad de adaptación frente a variaciones de caudal o presión durante el funcionamiento del sistema.

El dimensionamiento contempla además la estimación de la potencia requerida por el sistema de bombeo, parámetro fundamental para el posterior diseño del sistema fotovoltaico. Para ello se consideran tanto las condiciones nominales de operación como las pérdidas energéticas asociadas al transporte de agua y al rendimiento del equipo hidráulico. Este procedimiento permite establecer la demanda energética real del sistema y garantizar compatibilidad entre la bomba y la capacidad de generación fotovoltaica.

Se incorporan criterios orientados a la reducción del consumo energético y al incremento de la eficiencia global del sistema. Entre ellos se incluyen la optimización de diámetros hidráulicos, la disminución de pérdidas de carga y la selección de bombas con elevados rendimientos hidráulicos, contribuyendo a reducir costos operacionales y mejorar la sostenibilidad técnica del sistema de riego.

2.7. Diseño energético del sistema fotovoltaico

En esta etapa se dimensiona el sistema fotovoltaico destinado a suministrar la energía eléctrica necesaria para el funcionamiento del sistema de bombeo del riego presurizado. Tiene como objetivo garantizar compatibilidad entre la demanda energética del sistema hidráulico y la capacidad de generación solar disponible, asegurando continuidad operativa, estabilidad energética y eficiencia global de la instalación.

Inicialmente se determina la demanda energética requerida para el funcionamiento del sistema hidráulico, con-

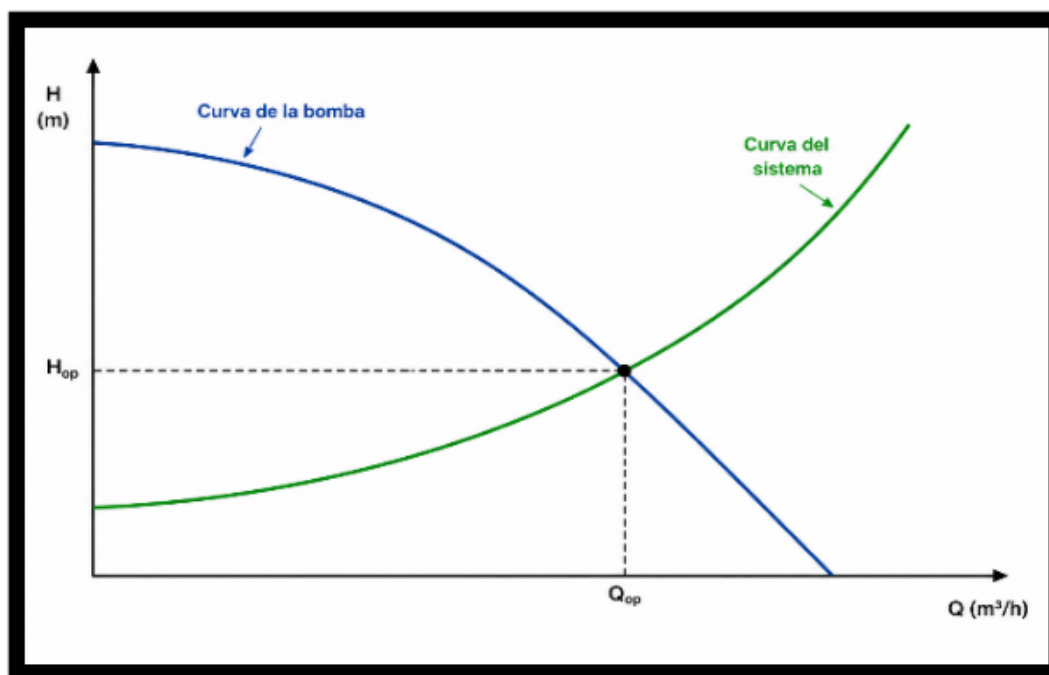


Figure 2.4. Curva característica de funcionamiento de la bomba.

siderando la potencia nominal del equipo de bombeo y el tiempo diario de operación establecido para el sistema de riego. Esta estimación constituye la base para el dimensionamiento energético del sistema fotovoltaico y permite cuantificar el consumo eléctrico asociado al transporte y distribución del agua. La energía demandada se calcula mediante la ecuación (2.4):

$$E_d = P_b \cdot t \quad (2.4)$$

Donde: E_d es la energía diaria (Wh/día); P_b es la potencia de la bomba (W); y t es el tiempo de funcionamiento diario (horas).

Se incorporan factores asociados a pérdidas eléctricas y eficiencia de conversión energética, considerando el rendimiento de inversores, conductores eléctricos, conexiones y demás componentes del sistema fotovoltaico. Se analizan condiciones ambientales variables como temperatura de operación, radiación solar incidente y posibles pérdidas por sombreado, aspectos que influyen directamente en el desempeño energético del sistema.

La potencia requerida del generador fotovoltaico se determina en función de la demanda energética calculada y de la disponibilidad de recurso solar en el área de instalación, expresada generalmente mediante las horas solares pico (HSP). Esta relación permite establecer la capacidad mínima de generación necesaria para garantizar el abastecimiento energético del sistema de bombeo, se muestra en la ecuación (2.5):

$$P_{PV} = \frac{E_d}{HSP} \quad (2.5)$$

Donde: P_{PV} representa la potencia pico del generador (Wp); E_d es la energía diaria (Wh/día); y HSP son las horas solares pico (h/día).

El análisis del recurso solar se desarrolla mediante registros meteorológicos y bases de datos de radiación solar, permitiendo evaluar la variabilidad temporal de la irradiancia y estimar el potencial energético disponible. Para ello se consideran curvas de radiación diaria, perfiles horarios de generación y comportamiento estacional de la energía solar incidente, parámetros fundamentales para garantizar estabilidad en el suministro eléctrico.

Durante esta etapa se seleccionan y configuran los principales componentes del sistema fotovoltaico, incluyendo

módulos solares, inversores, estructuras de soporte, conductores eléctricos, dispositivos de protección y sistemas de conexión. Esto se efectúa considerando criterios de eficiencia energética, compatibilidad eléctrica y confiabilidad operacional. En la figura 2.5 se representan todos los componentes principales de un sistema fotovoltaico y su relación entre ellos.

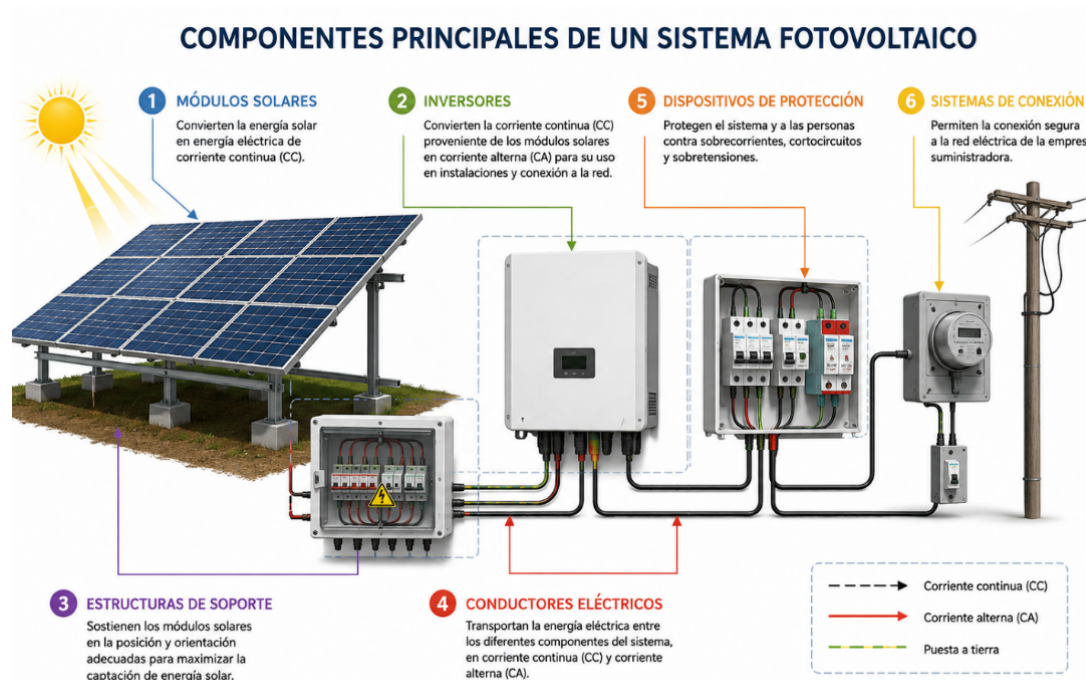


Figure 2.5. Componentes principales de un sistema fotovoltaico.

También se implementan criterios técnicos relacionados con orientación, inclinación y disposición geométrica del campo fotovoltaico, orientados a maximizar la captación de radiación solar y optimizar el rendimiento global del sistema. La configuración espacial de los paneles se analiza con el propósito de reducir pérdidas por sombreado, mejorar la ventilación natural de los módulos y mantener condiciones adecuadas de generación energética durante la operación del sistema.

La integración entre el sistema hidráulico y el sistema fotovoltaico constituye uno de los aspectos centrales de la metodología propuesta, debido a que el comportamiento energético del bombeo depende directamente de la disponibilidad de generación solar. Por esta razón, se evalúa la compatibilidad entre la demanda hidráulica, la capacidad de generación fotovoltaica y las condiciones reales de operación, garantizando un funcionamiento estable y energéticamente sostenible del sistema de riego.

2.8. Evaluación integral del sistema

La última etapa metodológica corresponde a la evaluación técnica, hidráulica y energética del sistema diseñado, fase en la cual se realiza el análisis integral del comportamiento operacional de la instalación con el propósito de verificar el cumplimiento de los criterios de diseño establecidos durante el desarrollo metodológico. Esta etapa permite validar la viabilidad técnica del sistema de riego fotovoltaico y comprobar la compatibilidad funcional entre los componentes hidráulicos y energéticos que conforman la instalación.

La evaluación hidráulica considera parámetros asociados al desempeño de la red de distribución, incluyendo presiones de operación, caudales de suministro, pérdidas de carga, velocidades de circulación y uniformidad de aplicación del agua en los emisores. Estos indicadores permiten determinar el grado de estabilidad hidráulica del sistema y verificar que las condiciones de operación se mantengan dentro de los rangos admisibles establecidos en el diseño.

Se analiza la eficiencia de distribución del agua mediante indicadores de uniformidad hidráulica y eficiencia de aplicación, los cuales permiten evaluar la capacidad del sistema para suministrar el recurso hídrico de manera homogénea en toda el área irrigada. Esto resulta fundamental para evitar déficits localizados de humedad, reducir pérdidas por escorrentía o infiltración profunda y optimizar el aprovechamiento del agua disponible.

La evaluación energética incorpora el análisis del comportamiento del sistema de bombeo y del generador fotovoltaico bajo condiciones reales de operación. Para ello se consideran variables relacionadas con demanda energética, eficiencia de conversión, rendimiento del bombeo y capacidad de generación solar. Este procedimiento permite verificar la compatibilidad entre la energía requerida por el sistema hidráulico y la energía suministrada por el sistema fotovoltaico.

Durante esta fase también se evalúa el comportamiento operativo del sistema fotovoltaico frente a variaciones de radiación solar y condiciones ambientales, verificando estabilidad en la generación eléctrica y continuidad en el funcionamiento del sistema de riego. Asimismo, se analizan pérdidas energéticas asociadas a inversores, conductores eléctricos y demás componentes de la instalación, permitiendo identificar posibles limitaciones operativas y oportunidades de optimización energética.

La integración de herramientas de simulación hidráulica y análisis energético permite validar técnicamente el funcionamiento global del sistema antes de su implementación física. Mediante estas simulaciones se verifican escenarios de operación variables, comportamiento de presiones en condiciones críticas y respuesta energética del sistema frente a diferentes demandas hidráulicas.

Adicionalmente, la metodología contempla la evaluación de beneficios asociados al empleo de energía solar como fuente de alimentación del sistema de bombeo, considerando aspectos relacionados con reducción del consumo de energía convencional, disminución de costos operacionales y mitigación del impacto ambiental derivado del uso de combustibles fósiles. Estos criterios permiten valorar el aporte del sistema fotovoltaico desde una perspectiva de sostenibilidad energética y ambiental.

03 DISCUSIÓN DE LA METODOLOGÍA

La aplicación de la metodología permite estructurar de manera coherente el proceso de diseño del sistema de riego, evidenciando una integración efectiva entre los componentes agronómicos, hidráulicos y energéticos. La organización por etapas facilita la transición entre fases, asegurando que cada decisión técnica estuviera fundamentada en información previamente definida.

Se observa una relación directa entre el diseño agronómico y el diseño hidráulico, donde la determinación de la demanda hídrica condiciona la configuración de la red de distribución. Esta dependencia funcional permite evitar inconsistencias en el dimensionamiento del sistema, contribuyendo a una mayor eficiencia en la distribución del agua.

La incorporación del sistema energético dentro del proceso metodológico permite establecer un vínculo claro entre la demanda hidráulica y la capacidad de generación fotovoltaica. Esta integración favorece el equilibrio entre consumo y suministro energético, lo que resulta esencial en sistemas autónomos.

Asimismo, el uso de herramientas de modelación y simulación permite evaluar el comportamiento del sistema antes de su implementación, reduciendo la incertidumbre y facilitando la identificación de posibles mejoras en el diseño. Este enfoque introduce un componente preventivo que fortalece la confiabilidad del sistema.

La metodología demuestra ser adaptable a diferentes condiciones del entorno, ya que parte de una caracterización específica del área de estudio. Esto permite ajustar el diseño a variables locales, incrementando su aplicabilidad en distintos contextos agrícolas.

04 CONCLUSIONES

La metodología propuesta integra de manera coherente los componentes agronómicos, hidráulicos y energéticos requeridos para el diseño de sistemas de riego por aspersión alimentados mediante energía solar fotovoltaica.

La estructuración metodológica en etapas secuenciales permite desarrollar el diseño de forma organizada y

técnicamente articulada, garantizando continuidad lógica entre las diferentes fases del proceso.

La incorporación de herramientas de modelación hidráulica facilita la evaluación operacional de la red, permitiendo verificar parámetros fundamentales asociados al comportamiento hidráulico del sistema. Asimismo, el dimensionamiento integrado del sistema de bombeo y del sistema fotovoltaico garantiza compatibilidad entre la demanda hidráulica y la disponibilidad energética.

La metodología constituye una herramienta técnicamente aplicable para el desarrollo de sistemas de riego sostenibles, favoreciendo la eficiencia energética y la reducción del impacto ambiental en la producción agrícola.

05 REFERENCIAS

- Barrueto Guzmán, A., Barraza Vicencio, R., Ardila-Rey, J. A., Núñez Ahumada, E., González Araya, A., & Arancibia Moreno, G.** (2018). A cost-effective methodology for sizing solar pv systems for existing irrigation facilities in Chile. *Energies*, 11(7), 1853. <https://doi.org/10.3390/en11071853>
- Bawa, A.-R., Amponsah, W., & Quansah, D. A.** (2025). Design, simulation, and economic analysis of a solar photovoltaic-powered pumping system for drip irrigation of a 1-ha bean farm in a tropical climate. *Journal of Engineering*, 2025(1), 1662260. <https://doi.org/10.1155/je/1662260>
- Carrión, P., Montero, J., & Tarjuelo Martín-Benito, J. M.** (2001). Aplicación de la simulación al diseño de los sistemas de riego por aspersión: El modelo sirias. <https://hdl.handle.net/2099/4493>
- Cauteruccio, A., & Lanza, L. G.** (2023). The long-term performance of a rainwater harvesting system based on a quasi-bicentennial rainfall time series. *Sustainability*, 15(21), 15619. <https://doi.org/10.3390/su152115619>
- Gevorkov, L., Domínguez-García, J. L., & Romero, L. T.** (2023). Review on solar photovoltaic-powered pumping systems. *Energies*, 16(1), 94. <https://doi.org/10.3390/en16010094>
- Gutierrez, J., Merino, G., Lara, D., & Salazar, L.** (2021). Hydraulic assessment of a photovoltaic system driving a conventional ac surface electric pump. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 45, 101060. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101060>
- Habib, S., Liu, H., Tamoor, M., Zaka, M. A., Jia, Y., Hussien, A. G., Zawbaa, H. M., & Kamel, S.** (2023). Technical modelling of solar photovoltaic water pumping system and evaluation of system performance and their socio-economic impact. *Heliyon*, 9(5). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16105>
- Hassan, O. H., Elhadidy, M. S., Elgohr, A. T., Ali, A. O., El-Mahdy, M. H., & Zaki, M.** (2024). Performance evaluation of a standalone solar-powered irrigation system in desert regions using pvsyst: A comprehensive analysis. *2024 25th International Middle East Power System Conference (MEPCON)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/MEPCON63025.2024.10850121>
- Martín-Benito, J. M. T.** (1991). *El riego por aspersión*. Universidad de Castilla-La Mancha.
- Mérida García, A., Fernández García, I., Camacho Poyato, E., Montesinos Barrios, P., & Rodríguez Díaz, J. A.** (2018). Coupling irrigation scheduling with solar energy production in a smart irrigation management system. *Journal of Cleaner Production*, 175, 670–682. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.093>
- Mesele, H., Grum, B., Aregay, G., & Berhe, G. T.** (2024). Evaluation and comparison of infiltration models for estimating infiltration capacity of different textures of irrigated soils. *Environmental Systems Research*, 13(1), 26. <https://doi.org/10.1186/s40068-024-00356-5>
- Navarro-González, F. J., Pardo, M. Á., Chabour, H. E., & Alskaf, T.** (2023). An irrigation scheduling algorithm for sustainable energy consumption in pressurised irrigation networks supplied by photovoltaic modules. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 25(6), 2009–2024. <https://doi.org/10.1007/s10098-023-02486-3>
- Rossman, L. A.** (2001). *Epanet 2 manual del usuario*.
- Vishwakarma, D. K., Yadav, D., Kumar, R., Kumar, R., Bhat, S. A., Mirzania, E., & Kuriqi, A.** (2025). Assessing the performance of various infiltration models to improve water management practices. *Paddy and Water Environment*, 23(1), 77–93. <https://doi.org/10.1007/s10333-024-01000-9>

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

ORCID de los autores

Samantha Lazara Cáceres Fuente <https://orcid.org/0009-0008-8432-4761>

Daniela Córdova de Horta <https://orcid.org/0000-0002-7284-9682>

Modelación numérica de la propagación del oleaje en el Malecón Tradicional de La Habana mediante el modelo numérico SWAN

Kevin Cruz BatistaE-MAIL: cruzbatistakevin@gmail.com

Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE). La Habana, Cuba.

Emilio Escartín Sauleda

E-MAIL:

Departamento de Geociencias. Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE). La Habana, Cuba.

Patricia Ruth de Horta Brito

E-MAIL:

Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE). La Habana, Cuba.

Luis F. Córdova LópezE-MAIL: cordova@tesla.cuaje.edu.cu

Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE). La Habana, Cuba.

RESUMEN

Se presenta una investigación integral centrada en la modelación numérica de la propagación del oleaje hacia el Malecón Tradicional de La Habana. El estudio define las condiciones de frontera mediante la caracterización del clima marítimo y los niveles del mar, para luego establecer el modelo SWAN sobre mallas de cómputo anidadas. Los resultados analizan el comportamiento de la altura de ola significativa bajo diferentes escenarios meteorológicos y direcciones de ataque, determinando las profundidades límites y los tramos más vulnerables de la estructura. Este trabajo establece las bases hidrodinámicas necesarias para la futura modelación física en 3D de alternativas de protección costera.

PALABRAS CLAVE: *SWAN, Malecón de La Habana, clima marítimo, modelación numérica, propagación de oleaje*

Numerical wave propagation modeling at the Traditional Havana Malecón using the SWAN model

ABSTRACT

Comprehensive research focused on the numerical modeling of wave propagation towards the Traditional Havana Malecón is presented. The study defines the boundary conditions through the characterization of the maritime climate and sea levels, to then establish the SWAN model on nested computational grids. The results analyze the behavior of the significant wave height under different meteorological scenarios and attack directions, determining the limit depths and the most vulnerable sections of the structure. This work establishes the necessary hydrodynamic bases for future 3D physical modeling of coastal protection alternatives.

KEYWORDS: *SWAN, Havana Malecón, maritime climate, numerical modeling, wave propagation*

01 INTRODUCCIÓN

El litoral norte de la Ciudad de La Habana, y específicamente el sector del Malecón Tradicional, constituye una zona de valor estratégico, socioeconómico y cultural incalculable para Cuba. Sin embargo, su configuración geográfica lo hace altamente vulnerable a eventos hidrometeorológicos extremos como frentes fríos, bajas extrat-

ropicales y huracanes de gran intensidad. Estos fenómenos generan inundaciones costeras severas por rebase del oleaje, las cuales se ven acentuadas por la estrechez de la plataforma insular y los efectos del cambio climático, manifestados en el ascenso acelerado del nivel medio del mar.

Esta investigación integral se ha estructurado en fases fundamentales que combinan la modelación numérica avanzada con la modelación física a escala.

En el presente trabajo, el objetivo central es establecer la plataforma técnica, las condiciones de frontera y la propagación de oleaje hacia aguas someras mediante la configuración del modelo numérico SWAN (Simulating Waves Nearshore). Se aborda de manera profunda la caracterización del clima marítimo en aguas profundas y la determinación de los niveles del mar bajo diferentes periodos de retorno. Asimismo, se detalla la construcción de las mallas de cómputo anidadas y el análisis de resultados, definiendo los escenarios de diseño que permitirán, en última instancia, proponer soluciones de ingeniería robustas para la protección de la capital.

02 MÉTODOS

2.1. Breve caracterización de la zona de estudio

El Malecón de La Habana constituye un sistema de defensa costera de 7,23 km de longitud, extendiéndose desde el Castillo de la Chorrera hasta la entrada de la Bahía. Su construcción, ejecutada entre 1901 y 1959 ganando terreno al mar sobre accidentes geográficos como la antigua Caleta de San Lázaro, presenta una estructura heterogénea con una altura media de coronación de 3,9 m sobre el nivel del mar. La zona se asienta sobre una plataforma insular extremadamente estrecha, lo que maximiza el impacto del oleaje y favorece rebases severos, agravados por un estado técnico que muestra socavaciones en el muro y el vial debido a décadas de explotación y exposición constante. Hidráulicamente, el área es altamente vulnerable debido a la presencia de 33 drenes pluviales (17 de ellos de gran sección) que en la actualidad operan mayoritariamente semisumergidos por el ascenso del nivel medio del mar inducido por el cambio climático. Ante la alta densidad de infraestructura hotelera, turística y residencial de alto valor patrimonial, y considerando el registro histórico de 1271 frentes fríos en las últimas 60 temporadas (de los cuales 85 han sido clasificados como fuertes), la investigación mantiene la subdivisión técnica en seis tramos críticos establecida en 1993 por el Grupo de Expertos de la capital (Fig. 2.1), basándose en criterios de exposición al oleaje, altura del muro y la influencia de las desembocaduras del río Almendares y la entrada de la Bahía (Córdova López, 2017; León Arias, 2023).

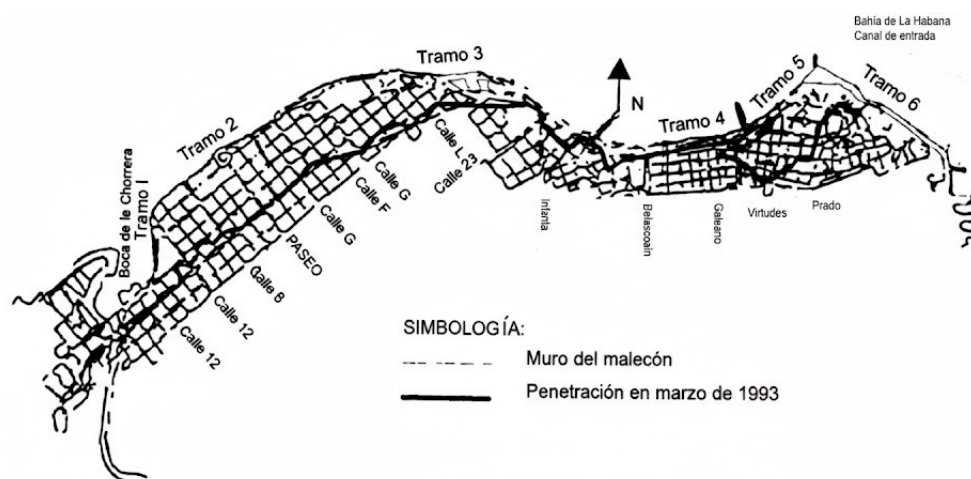


Figure 2.1. Vista en planta del malecón de La Habana y su división por subtramos.

2.2. Definición del clima marítimo y niveles del mar

En este apartado se analiza la información de clima marítimo para determinar los niveles del mar según diferentes periodos de retorno y el comportamiento del oleaje en aguas profundas basándose en fuentes como INSMET

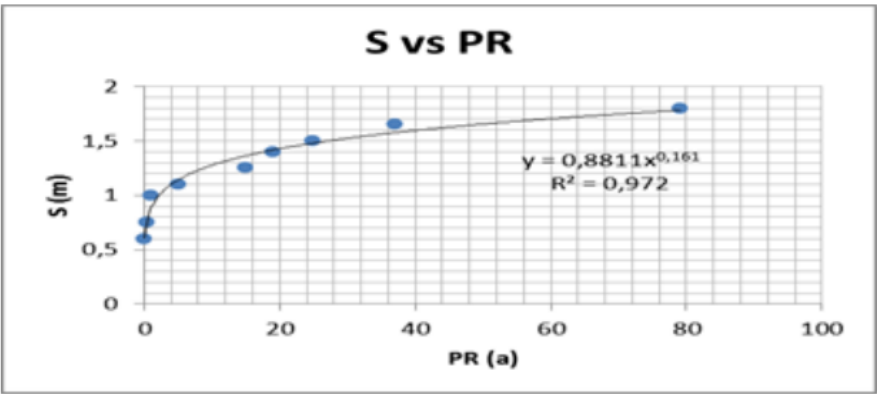
(2011, 2015), Geocuba (2011) y Global Wave Statistics (Hogben et al., 1985; Mitrani & Pérez, 1994; Morales et al., 1995).

Niveles del mar

Se considera la surgencia y la marea astronómica para relacionar la sobreelevación del mar con el período de retorno (Córdova López, 2017) (ver Fig. 2.2).

Table 2.1. Sobreelevación del mar según el periodo de retorno.

PR (años)	5	10	25	50	75	100
S (m)	1,15	1,29	1,49	1,68	1,79	1,88



PR (años)	5	10	25	50	75	100
S (m)	1,15	1,29	1,49	1,68	1,79	1,88

Figure 2.2. Sobreelevación del mar (m) vs periodo de retorno (PR) en años. Fuente: Pérez *et al.* (2015) (Pérez et al., 2015).

Marea y cambio climático

Se define el valor de la pleamar máxima (HHW) en 0,40 m respecto al nivel medio del mar (MSL) para la temporada de huracanes. La Tabla 2.2 muestra el comportamiento detallado de la marea astronómica (Pérez et al., 2015).

Table 2.2. Marea astronómica anual y en época de huracanes en la zona de estudio.

Referente a:	Año		Temporada de huracanes	
	MLLW (m)	MSL (m)	MLLW (m)	MSL (m)
Máximo HHW	0,58	0,40	0,58	0,40
Máximo LLW	-0,15	-0,33	-0,12	-0,30

Fuente: Adaptado de INSMET (Pérez et al., 2015).

De acuerdo con el macroproyecto nacional, se estima una sobreelevación por cambio climático de +0,29 m para 2050 y +0,95 m para 2100 (AMA, 2005).

2.3. Análisis del oleaje en aguas profundas

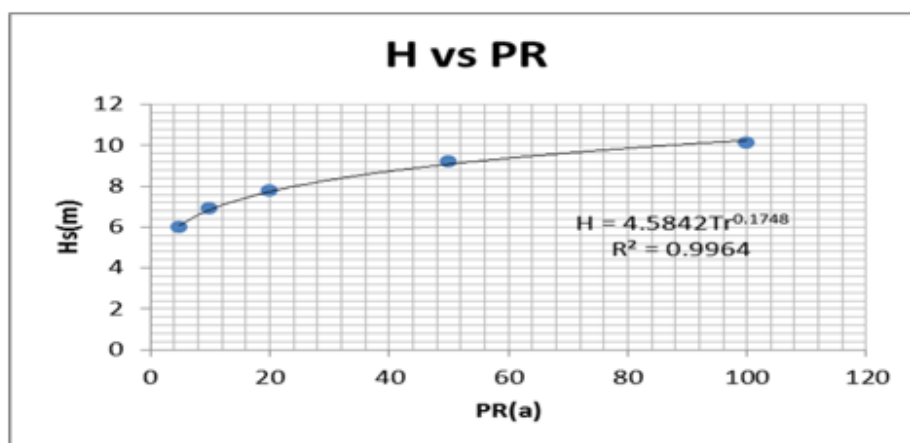
Para desarrollar el estudio de propagación del oleaje, se realizó una comparación entre las fuentes INSMET (2011, 2015), Geocuba (2011) y Global Wave Statistics, las cuales describen el comportamiento del oleaje en aguas profundas.

Comparativa de fuentes nacionales (INSMET y Geocuba)

En la Tabla 2.3 se comparan los parámetros de ambas instituciones.

Table 2.3. Comparativa de condiciones de oleaje según INSMET (2011) y Geocuba (2011).

PR (años)	INSMET (2011)		Geocuba (2011)	
	H_s (m)	T_p (s)	H_s (m)	T_p (s)
10	7,75	10,57	3,64	6,9
20	9,06	10,98	4,08	7,3
50	10,34	11,04	4,68	7,7
100	11,93	11,55	5,16	8,0



PR (años)	5	10	20	50	100
H_s (m)	6,0	6,9	7,8	9,2	10,1

Figure 2.3. Altura de ola significativa (m) en aguas profundas vs periodo de retorno (INSMET 2015).

Global Wave Statistics y ajuste probabilístico

Los datos se presentan en histogramas estacionales (Fig. 2.4). Para procesar estos datos, se utilizó el enfoque de distribución inicial mediante una distribución log-normal, obteniendo coeficientes $R^2 > 0,995$. La probabilidad de excedencia se expresa mediante la ecuación (2.1):

$$P(H_s > h) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln h - \mu}{\sigma}\right) \quad (2.1)$$

donde Φ es la función de distribución acumulada normal estándar, μ y σ son la media y la desviación estándar del logaritmo de la altura de ola, respectivamente.

Al contrastar todas las fuentes (Fig. 2.6), se evidencia que los datos de Geocuba (2011) subestiman la energía del oleaje. Los registros del INSMET muestran mayor coherencia con la fuente internacional. Por ello, se

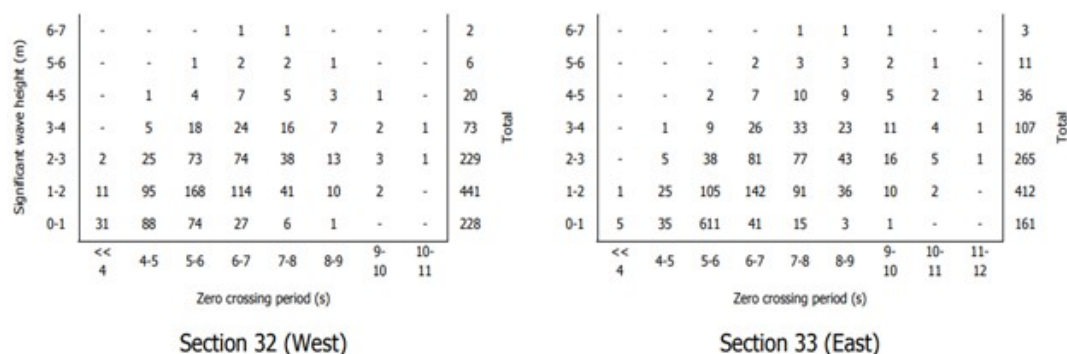


Figure 2.4. Histogramas de olas (Global Wave Statistics).

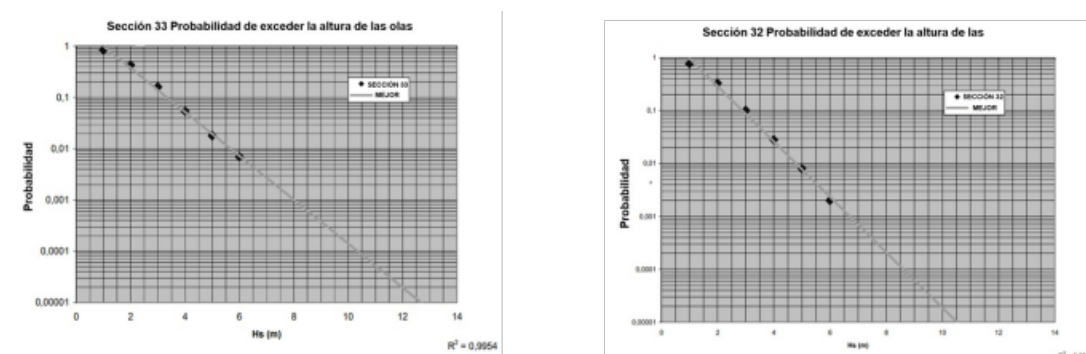


Figure 2.5. Probabilidades de excedencia de la altura de las olas (ajuste Log-normal).

seleccionan los datos del INSMET (2015).

2.4. Materiales y métodos

Los materiales empleados fueron suministrados por el Grupo de Ingeniería Costera y Marítima del CIH, CUJAE, en colaboración con el INRH (Pérez et al., 2015).

Características batimétricas y línea de costa

Se utilizaron 16 planos batimétricos elaborados por Geocuba Estudios Marinos (escalas 1:5000 y 1:500). El fondo predominante se compone de fango y conchuela. La zona de estudio se enmarca entre las calles Marina y Prado (Fig. 2.7).

2.5. Descripción del modelo numérico SWAN

Para la simulación de la propagación del oleaje en la zona de estudio, se utilizó el modelo numérico SWAN (Simulating Waves Nearshore). Este es un modelo espectral de tercera generación diseñado para la obtención de parámetros del oleaje en áreas costeras, lagos y estuarios a partir de vientos, batimetría y corrientes.

Ecuación fundamental de balance de acción

A diferencia de los modelos de fase resuelta, SWAN se basa en la ecuación de balance de la acción de la ola. La densidad de acción se define como $N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta)/\sigma$, donde σ representa la frecuencia relativa y θ la dirección de la ola. Se utiliza la acción en lugar de la energía debido a que, en presencia de corrientes, la densidad de acción se conserva mientras que la energía no (Holthuijsen, 2005).

La ecuación cinemática de balance de acción en coordenadas cartesianas se expresa como:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(c_x N) + \frac{\partial}{\partial y}(c_y N) + \frac{\partial}{\partial \sigma}(c_\sigma N) + \frac{\partial}{\partial \theta}(c_\theta N) = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad (2.2)$$

Donde los términos del miembro izquierdo representan: $\partial N/\partial t$, la tasa de cambio local de la densidad de

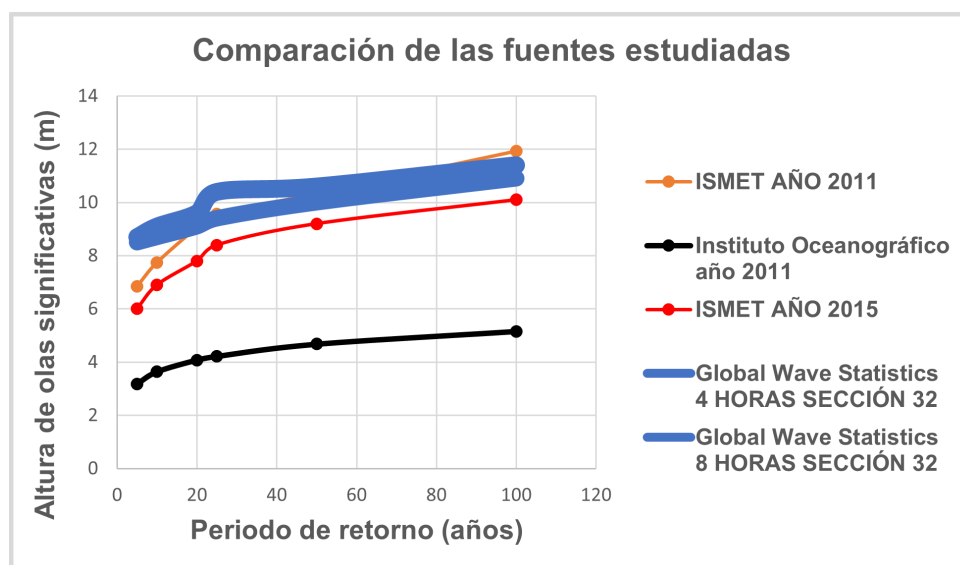


Figure 2.6. Comparación de alturas significativas entre las fuentes estudiadas.



Figure 2.7. Zonas de levantamiento batimétrico: General (1:5000) y Malecón Tradicional (1:500) (Hernández, 2019; Pérez et al., 2015).

acción en el tiempo; los términos en x e y , la propagación espacial de la acción en el espacio geográfico (con velocidades de grupo c_x y c_y); el término en σ , el desplazamiento de la frecuencia relativa debido a variaciones en la profundidad y corrientes; y el término en θ , la refracción inducida por la profundidad y las corrientes.

Procesos físicos

El miembro derecho de la ecuación, S_{tot} , constituye el balance de los términos fuente que representan los procesos físicos de generación, disipación y transferencia de energía:

$$S_{tot} = S_{in} + S_{nl3} + S_{nl4} + S_{ds,w} + S_{ds,b} + S_{ds,br} \quad (2.3)$$

donde: S_{in} es la generación por viento; S_{nl3} y S_{nl4} son las interacciones no lineales entre ondas (tríadas y cuádrupletes); $S_{ds,w}$ es la disipación por *whitcapping*; $S_{ds,b}$ es la disipación por fricción con el fondo marino; y $S_{ds,br}$ es la disipación por rotura inducida por la profundidad.

Fenómenos que simula y limitaciones

El modelo simula procesos de refracción, asomeramiento (*shoaling*), y disipación por fricción y rotura. Sin embargo, presenta limitaciones: al ser un modelo de fase promediada, no simula olas individuales, sino la evolución del espectro estadístico; y la difracción se incluye mediante una aproximación y no es exacta en estructuras extremadamente complejas.

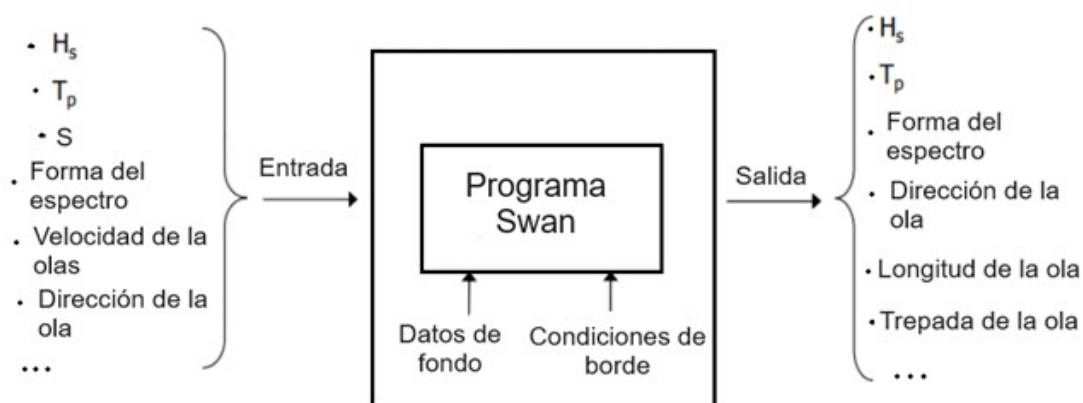


Figure 2.8. Vista esquemática de la aplicación del programa SWAN.

2.6. Establecimiento del modelo numérico

Utilizar el modelo numérico SWAN para una situación específica significa haber ajustado el modelo a las condiciones ambientales y la geografía locales, y puede implicar el empleo de múltiples cuadrículas anidadas. Por lo tanto, al proporcionar datos de entrada, SWAN puede generar resultados que sean específicamente válidos para el caso considerado. Para el caso de este informe, las partes más importantes del modelo SWAN son los conjuntos de datos de fondo para ambas cuadrículas, y los parámetros de entrada más importantes son la altura significativa de las olas, nivel del mar, el período de las olas y la dirección de estas. También se deben tomar decisiones sobre las velocidades y direcciones del viento. La mayoría de los parámetros de cálculo del programa se pueden dejar en sus valores predeterminados (Baart, van Kruchten, et al., 2006).

Mallas de cómputo

Se definieron dos mallas de cómputo regulares. La primera es una **malla gruesa** para la propagación en gran parte del litoral (Marina Hemingway hasta Rincón de Guanabo), con extensión de 25 075 m y resolución de 85 m (Fig. 2.9). La segunda es una **malla fina** de detalle para el Malecón Tradicional (6000 m x 4000 m), con resolución de 15 m en X y 10 m en Y.

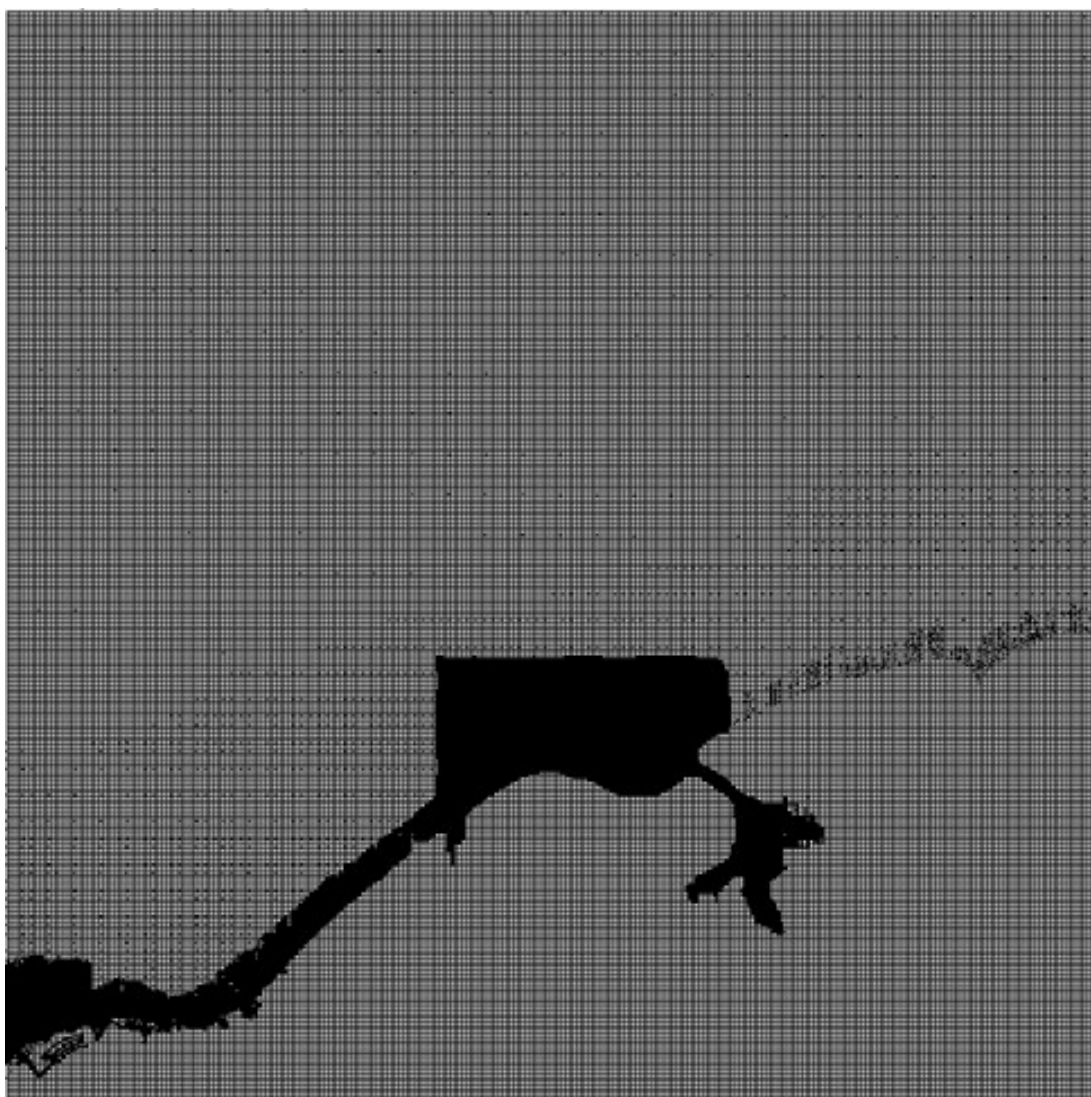


Figure 2.9. Malla de cómputo gruesa utilizada en la investigación.

Batimetría del modelo

La información batimétrica fue interpolada en ambas mallas de cómputo para representar las variaciones de profundidad del dominio (Fig. 2.10).

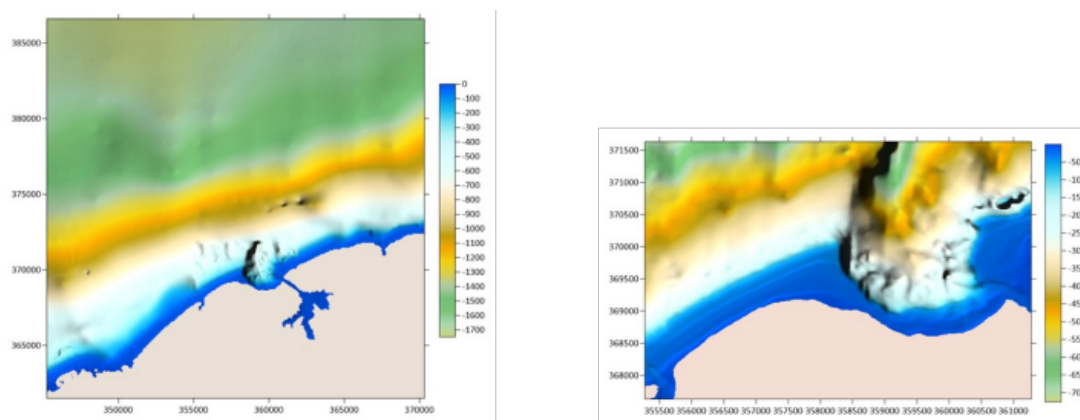


Figure 2.10. Batimetría interpolada para la malla gruesa (izq.) y malla fina (der.).

2.7. Definición del oleaje y niveles del mar

A partir de haber definido la caracterización del clima marítimo en aguas profundas y niveles del mar, se toman como fuente los datos del INSMET en el año 2015 y con ellos se crean los escenarios a simular.

A continuación, se muestran las alturas de olas significativas y niveles del mar con los que se estará llevando a cabo la simulación numérica, siendo 5 alturas de olas significativas y 3 niveles del mar, para los cuales se simulará en tres direcciones de oleaje N (norte), NE (noreste) y NW (noroeste), teniendo en cuenta que son las tres direcciones que influyen directamente en la zona de estudio, dando como resultado un total de 45 escenarios de propagación del oleaje hasta aguas someras (ver Tabla 2.4 y Tabla 2.5).

Table 2.4. Niveles del mar escogidos para la simulación numérica.

Periodo de retorno (años)	Nivel del Mar (m)
menor que 5 años	1
50 años más SEM 2050	1,97
WILMA más SEM 2050	2,3

Table 2.5. Alturas de olas significativas escogidas para la simulación numérica.

Periodo de retorno (años)	H_s (m) Aguas Profundas
menor que 5 años	4
5	6
25	8
50	9,2
100	10

03 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Selección de la profundidad límite para el modelo físico 3D

El análisis del comportamiento de la altura de ola significativa a lo largo de las isobatas de -50,0 m, -40,0 m, -30,0 m, -20,0 m y -10,0 m evidenció que, para alturas de ola en aguas profundas de 6,0 m y 10,0 m (dirección

Norte y nivel del mar de 1,0 m), no existen cambios disipativos notables hasta la isobata de -20,0 m (ver Fig. 3.1). Es a partir de la isobata de -10,0 m donde la altura de ola comienza a ser afectada significativamente por la fricción de fondo. Por consiguiente, se determinó que las profundidades de -20,0 m a -50,0 m son idóneas como límite de comienzo para la batimetría a reproducir en la futura modelación física en 3D.

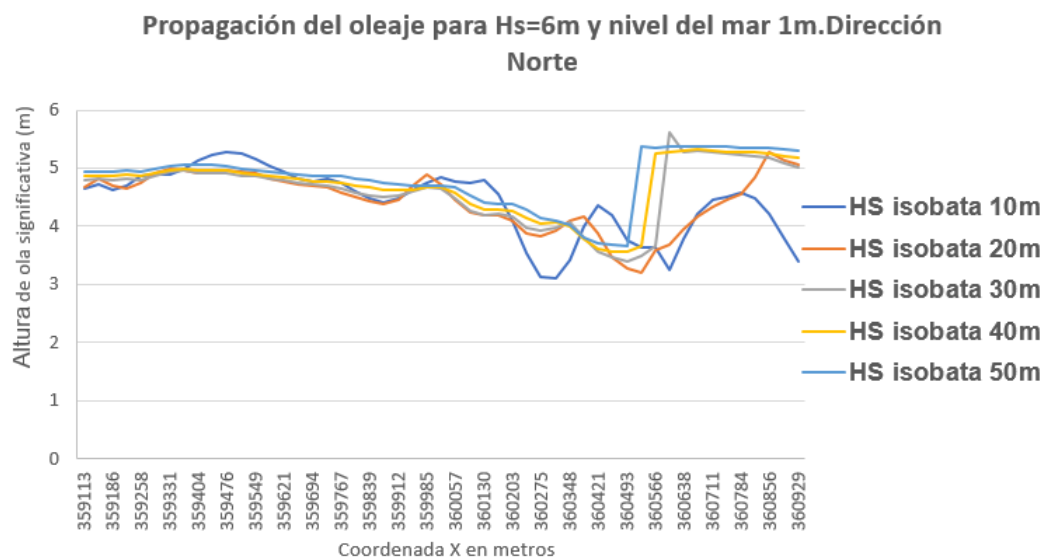


Figure 3.1. Comportamiento de la altura de ola significativa para diferentes profundidades.

3.2. Efecto de la dirección del oleaje y análisis por subtramos

Para definir el comportamiento del oleaje frente a la estructura, se modelaron las tres direcciones de ataque principales (Norte, Noroeste y Noreste) evaluadas en las isobatas críticas, bajo escenarios de periodo de retorno de 50 años. Los resultados de la modelación demostraron que las direcciones más desfavorables, generadoras de las mayores alturas de ola y potencial rebase, son la Norte y la Noroeste. De acuerdo con la respuesta hidrodinámica a lo largo de la costa, la zona de estudio se dividió en tres subtramos fundamentales (Fig. 3.2):

- Subtramo 1 (Calle Marina a Perseverancia): ante oleaje del Noreste, este tramo presentó alturas de ola significativas moderadas. Sin embargo, para la dirección Noroeste, los valores se incrementaron notablemente, oscilando entre 4,82 m y 6,07 m.
- Subtramo 2 (Calle Perseverancia a Blanco): resultó ser el más crítico bajo la dirección principal Norte. En este sector, para un periodo de retorno de 50 años, la altura de ola significativa alcanzó máximos de hasta 6,11 m en la profundidad de -4,0 m, concentrando la mayor energía de impacto contra el muro.
- Subtramo 3 (Calle Blanco a Prado): mostró una alta exposición ante oleajes de dirección Noroeste, registrando valores de altura de ola entre 4,77 m y 5,99 m.

Se constató además que, en aguas someras, la altura de ola es altamente sensible al incremento del nivel medio del mar; a mayor sobreelevación, menor disipación por rotura anticipada y mayor altura de ola incidente sobre el muro del Malecón (ver Fig. 3.3 y Fig. 3.4).

04 CONCLUSIONES

- El análisis comparativo del clima marítimo determinó que los registros analizados ofrecen la mayor representatividad estadística para la zona, definiendo un escenario crítico de altura de ola de 9,2 m para un periodo de retorno de 50 años.
- El establecimiento del modelo SWAN sobre mallas anidadas demostró que las direcciones de oleaje Norte y Noroeste son las más desfavorables para la infraestructura del Malecón Tradicional.
- El análisis espacial permitió subdividir la costa en tres tramos de comportamiento hidrodinámico difer-



Figure 3.2. Subtramos en que se divide la zona de estudio de acuerdo con el comportamiento de la altura de ola significativa frente a la estructura.

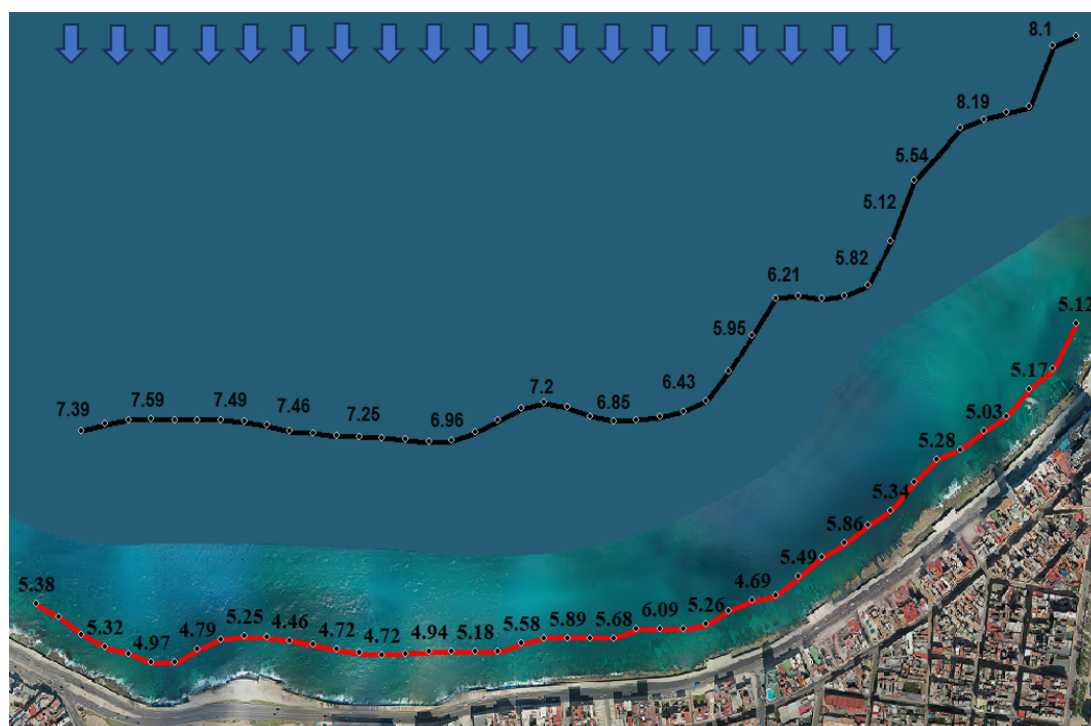


Figure 3.3. Efecto de la dirección norte en el oleaje para 50 años de periodo de retorno.

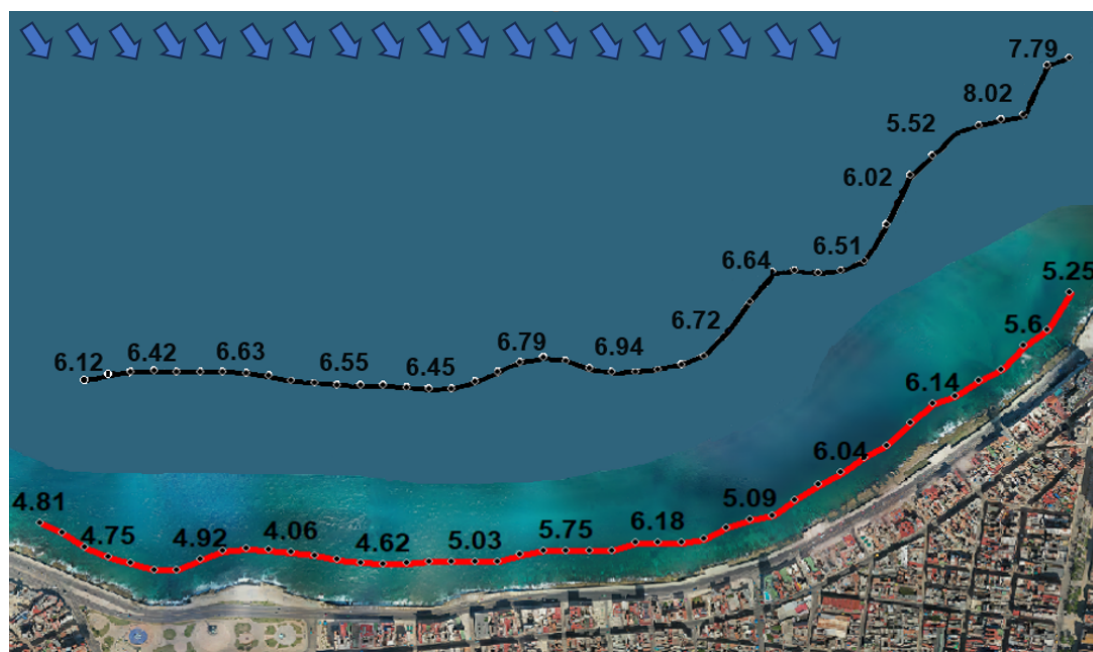


Figure 3.4. Efecto de la dirección noroeste en el oleaje para 50 años de periodo de retorno.

enciado, identificando al Tramo 2 (Perseverancia a Blanco) como el de mayor impacto bajo oleaje de componente Norte (máximo de 6,11 m).

- Se determinó que la batimetría a reproducir para los futuros modelos físicos en 3D debe iniciar en el rango de profundidades entre -20,0 m y -50,0 m, donde el oleaje aún no sufre alteraciones significativas por el fondo.

05 REFERENCIAS

- AMA. (2005). *Evaluación rápida de los efectos ambientales de las inundaciones costeras*. Agencia de Medio Ambiente. Cuba.
- Baart, S. A., van Kruchten, Y. J. G., et al. (2006). *Coastal defense for centro habana. integral coastal defense for section 4 of the malecón*.
- Córdova López, L. (2013). *Propuestas de obras de defensa de costas para el malecón tradicional* (Informe Técnico). Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), Cujae. La Habana, Cuba.
- Córdova López, L. (2017). *Evaluación de diferentes alternativas de protección contra inundaciones costeras en el malecón tradicional de la habana* (Informe Técnico). Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), Cujae. La Habana, Cuba.
- Córdova López, L., Buccino, M., Torres Hugues, R., Salerno, D., et al. (2016). Análisis de los resultados del estudio mediante modelación física del rebase del oleaje. propuesta de solución.
- Hernández, V. K. (2019). *Determinación de parámetros de diseño funcional en rompeolas sumergidos* [Tesis Doctoral]. CUJAE.
- Hogben, N., Dacunha, N. M. C., & Olliver, G. F. (1985). *Global wave statistics*. British Maritime Technology Limited.
- Holthuijsen, L. H. (2005). Wind waves, lecture notes ct5316.
- León Arias, D. (2023). *Determinación del rebase del oleaje aplicando el modelo xbeach, no hidrostático. caso de estudio malecón de la habana* [Tesis de Maestría]. Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”.
- Mitrani, I., & Pérez, R. (1994). *Informe del instituto de meteorología sobre las características hidrometeorológicas del litoral*. Instituto de Meteorología. La Habana, Cuba.

- Montero, D. A.** (2016). *Determinación del rebase del oleaje en el malecón tradicional habanero, mediante la aplicación del modelo matemático swash* [Trabajo de Diploma]. CUJAE.
- Morales, A., et al.** (1995). *Informe científico técnico especialidad de oceanografía, proyecto: Malecón habanero*. Instituto de Meteorología. La Habana, Cuba.
- Pérez, R., et al.** (2015). Niveles del mar y clima marítimo para el litoral habanero.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

ORCID de los autores

Kevin Cruz Batista	https://orcid.org/0009-0006-6386-7957
Emilio Escartín Sauleda	https://orcid.org/0000-0001-6858-2877
Patricia Ruth de Horta Brito	https://orcid.org/0000-0001-6502-8205
Luis F. Córdova López	https://orcid.org/0000-0001-8175-6819

Principios del flujómetro de Sector Circular

Alcides J. León MéndezE-MAIL: aleonm@civil.cujae.edu.cu

Centro de Investigaciones Hidráulicas, Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE), La Habana, Cuba.

RESUMEN

En el trabajo se presenta el diseño geométrico de un flujómetro del tipo deprimógeno, que se conforma a partir de la obstrucción que se genera al interceptar parcialmente, a noventa grados, un tramo de tubo con otro de igual o mayor diámetro. Esta penetración entre las dos tuberías deja en la que va a conducir el flujo, una superficie denominada en geometría, silla de montar cilíndrica. Para validar su función como flujómetro, se modelan matemáticamente cuatro posibles diseños empleando el ANSYS CFD. El valor de las pérdidas de carga permanentes, que introduce cada diseño, se contrasta con el valor de las pérdidas que introduce un flujómetro de Cuña validado por la norma ISO 5167-6, por tener un principio semejante al aquí expuesto, obteniéndose resultados que permiten justificar las posibilidades del diseño propuesto como flujómetro.

PALABRAS CLAVE: *hidrometría, medidores de caudal, CFD*

Principles of the Circular Sector Flowmeter

ABSTRACT

This paper presents the geometric design of a deprimogenic flowmeter, which is formed from the obstruction created by partially intersecting, at a ninety-degree angle, a section of pipe with another of equal or greater diameter. This penetration between the two pipes leaves a surface in the pipe that will carry the flow, known in geometry as a saddle surface. To validate its function as a flowmeter, four possible designs are mathematically modeled using ANSYS CFD. The value of the permanent head loss introduced by each design is compared with the value of the losses introduced by a wedge flowmeter validated according to ISO 5167-6, due to its similar principle. The results obtained justify the viability of the proposed design as a flowmeter.

KEYWORDS: *hydrometry, flowmeters, CFD*

01 INTRODUCCIÓN

Para las conducciones forzadas hay numerosas alternativas para la medición, en tiempo real, del caudal que circula por la sección transversal de una conductora. Los flujómetros del tipo deprimógenos (caudal como función de la pérdida de presión), tienen la fortaleza de ser muy robustos, de adaptarse a la medición de grandes y pequeños caudales, de poder ser construidos con la guía calificada de las actuales normas ISO y de permitir una fácil operación. Como elementos en contra se tiene, que introducen pérdidas permanentes de carga en el conducto, las cuales llegan a ser muy altas y en muchas de las variantes el proceso de construcción es tecnológicamente complejo y muy especializado.

Entre los últimos deprimógenos normados por las normas ISO está el que aparece en la ISO 5167-6 (International Organization for Standardization (ISO), 2022b) denominado en español flujómetro de Cuña (Wedge meter) de relativa fácil construcción, pero que para el diseño que se propone en la norma, el valor de las pérdidas de carga que introduce en el flujo lo limita para algunas aplicaciones. En reciente publicación de León y Chirino (León & Chirino, 2024), se modifica el diseño clásico de este flujómetro. Pero aún en esta solución la construcción se vuelve algo compleja. Además, se hace muy difícil si se quiere emplear tuberías de PE como las fabricadas en estos momentos en nuestro país.

En Cuba la producción nacional de tubería de PEAD y PEMD ha ido sustituyendo las antiguas conductoras

existentes en los sistemas hidráulicos. Debido a lo anterior, más la imperiosa necesidad existente de tener medidores de caudal para medianos y grandes diámetros de conductoras, que se adapten a cualquier situación en particular y basado en la idea del flujómetro de Cuña, se ha generado una nueva solución, ideal para ser implementada en tubería de polietileno. A esta nueva solución se le ha denominado flujómetro de Sector.

Basado en lo anteriormente expuesto, este trabajo se encamina al desarrollo de los principios de diseño de la nueva solución para la medición de caudales en conductoras a presión, de fluidos que admitan una pequeña disminución de la energía debido a las pérdidas de carga local que introducirá este flujómetro.

Para concluir este primer trabajo sobre esta variante de flujómetro deprimógeno se incluye un breve análisis de su comportamiento hidrodinámico a partir de modelar cuatro alternativas de solución con el programa ANSYS, de reconocido prestigio para este tipo de trabajo y comparar los resultados obtenidos con los del flujómetro de Cuña ya que sus principios de diseño son muy similares al que se propone.

02 BASES PARA EL DISEÑO

El flujómetro de sector se conforma con dos tuberías que se interceptan (Fig. 2.1), una, que es la principal o conductora, por la que van a circular los caudales que se quieren medir y otra, que será la que genere la obstrucción. En la figura 2.1 superior derecha, la parte azul que queda “incrustada” en la conductora, es la superficie de la tubería una vez que se realiza el corte. A esa figura geométrica se le conoce como *silla de montar cilíndrica* (saddle surface en inglés). La segunda tubería, que es la que genera el estrechamiento en la conductora, debe tener un diámetro exterior igual o mayor que el diámetro interior de la principal, para que se creen las condiciones hidrodinámicas que permitan que las líneas de corriente converjan y diverjan lo más suavemente posible al pasar por el estrechamiento.

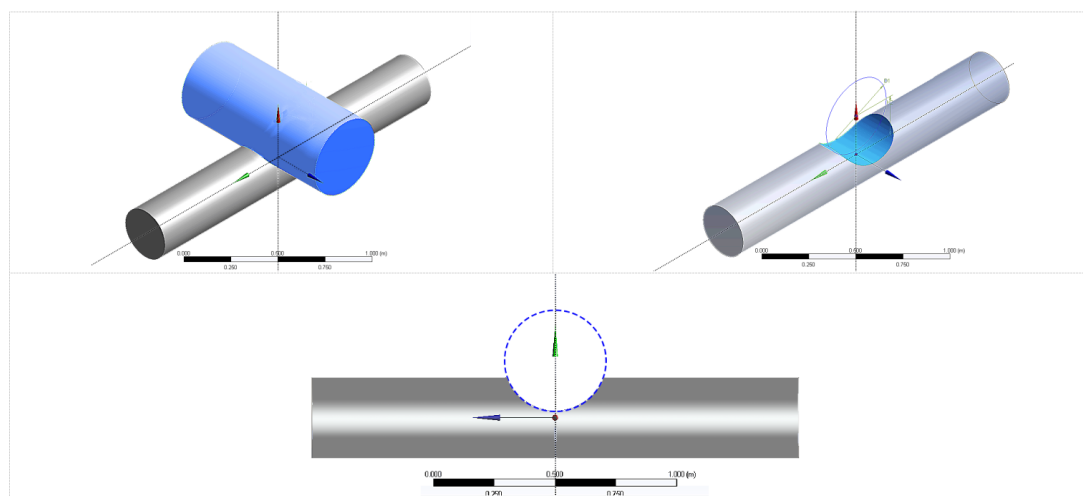


Figure 2.1. Secuencia de imágenes de la conformación del flujómetro en un tramo de tubería.

La construcción de este tipo de flujómetro es en extremo sencilla, ya que su base es tubería del mismo o diferente material que la conductora donde irá instalado el medidor. Para el tramo de tubería que forma parte del flujómetro y que está en línea con la conductora, se debe respetar los criterios de calidad que aparecen en la Norma ISO 5167-6 (International Organization for Standardization (ISO), 2022b) y se debe producir limpiamente el corte que irá sellado por el tramo de tubo, recortando este último para que quede conformado tal como se ve en el esquema de la figura 2.1 superior derecha. El exterior de la tubería que sella la zona de la silla de montar cilíndrica, creada en la conductora, debe estar limpio, mediante inspección visual, de incrustaciones que sobresalgan de forma evidente.

La medición del caudal se efectúa, al igual que todos los deprimógenos, midiendo la diferencia de presión entre dos puntos. Esta diferencia de presión local, se genera al incrementarse la velocidad del agua al pasar

por la obstrucción creada (Fig. 2.2). En la figura 2.2 aparecen dos alternativas de flujómetro, el de una sola obstrucción, denominado de simple sector (SSector) y el de dos obstrucciones simétricas, denominado de doble sector (DSector).

La altura h de la sección de la garganta y la tubería de radio R , que se empleará para interceptar la tubería conductora y crear las condiciones necesarias de estrechamiento y ensanchamiento gradual para conformar el flujómetro, influyen en los ángulos de entrada y salida del flujo en el tramo de tubería donde se produce el estrechamiento.

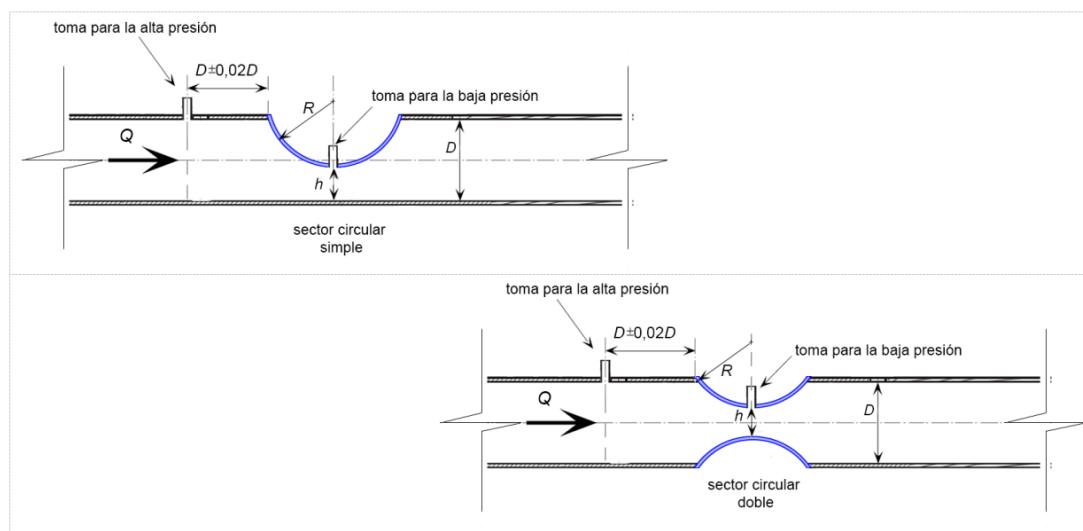


Figure 2.2. Perfil del tramo de tubería con el flujómetro.

A partir de ahora, se diferenciarán dos importantes variables: el diámetro interno de la tubería conductora, que se distinguirá con la letra D y el radio externo de la tubería que intercepta la conductora creando el estrechamiento, que se distinguirá con la letra R , o lo que es igual, R es la mitad del diámetro exterior del tubo que genera la silla de montar cilíndrica que se incrusta en la conductora.

2.1. Ángulos de entrada-salida y altura de la garganta (h)

Los flujómetros deprimógenos presentan una contradicción que debe resolverse para cada aplicación, dando peso relativo a cada una de las variables que intervienen en el proceso de medición del caudal. Las dos ecuaciones genéricas que intervienen en el proceso son la ecuación del gasto y la ecuación de las pérdidas de carga permanentes que cualquier deprimógeno introduce. Para lograr un buen diseño, en una aplicación dada, se debe llegar a una solución donde se obtenga un amplio intervalo de caudales a medir con las menores pérdidas de carga permanentes posibles.

Lograr lo anterior, implica un diseño retroactivo donde hay que ir analizando el peso relativo que cada variable tiene sobre el caudal mínimo y máximo posible a medir, las pérdidas de carga que se introducen y como esto influye en la calidad del servicio que brinda la conducción del agua.

La ecuación del gasto puede escribirse como a continuación se detalla:

$$Q = f(\text{tipo}, D, h, C_Q, \Delta p) \quad (2.1)$$

Donde: *tipo* se refiere al tipo de deprimógeno empleado (placa orificio, tobera ISA1932...); D es el diámetro interno de la conductora; h es la altura de la garganta del deprimógeno en la sección de mayor contracción; C_Q es el coeficiente de gasto del flujómetro, que a su vez es función del tipo de deprimógeno, de D y de h y en casos particulares, es una constante; y Δp es la diferencia de presión entre una sección aguas arriba de la entrada del flujómetro y otra en una sección intermedia, o aguas abajo de la salida.

Para una conductora de diámetro determinado, en la cual se ha colocado un tipo de deprimógeno en particular,

con una altura de garganta definida, la ecuación (2.1) puede reescribirse de la siguiente forma:

$$Q = f_1(\Delta p) \quad (2.2)$$

La ecuación (2.2) resume el principio de los flujómetros deprimógenos, que no es más que la relación entre el caudal que circula y el diferencial de presión local generado por el deprimógeno.

Por su parte, para una conductora de diámetro determinado, en la cual se ha colocado un tipo de deprimógeno en particular, con una altura de garganta definida la ecuación de las pérdidas de carga permanentes ($hf_{\text{permanentes}}$) puede escribirse de la siguiente forma:

$$hf_{\text{permanentes}} = f_2(\Delta p) \quad (2.3)$$

En el proceso de medición, para una conductora de diámetro dado con un tipo de deprimógeno intercalado, la geometría de la entrada y la salida del flujómetro juegan un importante papel sobre el valor de las pérdidas permanentes de carga, mientras que la altura de la garganta del medidor tiene un doble papel, ya que su valor incide tanto en las pérdidas de carga permanentes como en el intervalo de gastos posibles a medir, a partir del elemento secundario que se tenga para la medición del Δp .

2.2. Ángulos de entrada y salida

En una conducción forzada, el ángulo de entrada y salida del flujo en una obstrucción, creada por un accesorio o instrumento de mayor o menor diámetro que la conductora, tiene una gran repercusión en las pérdidas permanentes de energía que se introducen en el flujo que circula (Idel'cik, 1969; Mott, 2006). Un ejemplo muy contrastante de esto lo constituyen la Placa Orificio y el flujómetro Venturi. En el primer caso la entrada y salidas son bruscas, mientras que en el segundo el conducto de entrada que termina en la garganta del Venturi tiene ángulos muy pequeños al igual que el conducto de salida de la garganta a la conductora, esto hace que la diferencia entre las pérdidas de carga permanentes, para el resto de las condiciones iguales, sean entre 10 y 20 veces mayores para la placa, en dependencia de la relación de la altura de la garganta entre el diámetro del conducto (h/D).

El ángulo de entrada del flujómetro de sector es igual al ángulo de salida debido a la característica de la circunferencia que describe el radio exterior de la tubería que genera el sector (R). Estos ángulos dependen de la magnitud de R y de la altura h del estrechamiento que se requiera para el diseño del flujómetro. La figura 2.3 muestra, para un mismo diámetro interno de conductora, tres alternativas, entre las muchas posibles, para ilustrar esta característica de suma importancia a evaluar en el diseño.

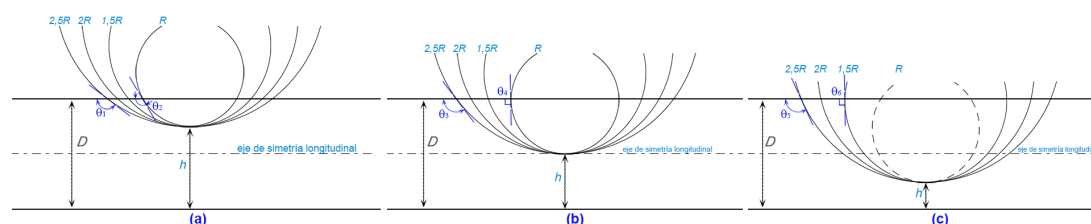


Figure 2.3. Imágenes mostrando la variación del ángulo de entrada y salida para diferentes valores de h y R .

Para los tres casos mostrados en la figura 2.3, el diámetro interno de la conductora (D) y el menor radio exterior de la tubería que genera el corte tienen una relación de 2:1. Esto se asume para facilitar las explicaciones actuales y futuras. Para los diseños prácticos las ecuaciones que se describirán más adelante definirán las dimensiones y características del corte a realizar en la conductora.

En la figura 2.3a, la altura del estrechamiento es la mayor de los tres casos presentados. Por tanto, los ángulos de entrada y salida de las variantes presentadas (R ; $1.5R$; $2R$ y $2.5R$) son los menores posibles en los tres casos analizados. Debe recordarse que para facilitar la explicación se ha asumido que D es igual a $2R$.

En la figura 2.3b, las cuatro tuberías interceptoras penetran más en la conductora hasta llegar a que la de

menor radio (R) toque el centro de la conductora, reduciendo la altura de la garganta a la mitad del diámetro ($h = 0,5D$) puede verificarse, tal como se indica en la imagen correspondiente, que el ángulo de entrada y salida es de 90 grados (90°). Esta condición es el límite para la tubería de radio R , ya que si penetrara más en la conductora el ángulo creado sería un fuerte obstáculo para las líneas de corriente, perdiéndose la geometría aerodinámica del sector y de la semicircunferencia como límite del sector. De igual forma el resto de los radios muestran ángulos de entrada y salida mayores que los mostrados en la figura 2.3a.

Por último, en la figura 2.3c se ha penetrado el corte de la conductora hasta el límite máximo que permite la tubería de radio $1,5R$. Exactamente igual que en el caso anterior los ángulos de entrada y salida disminuyen para los tres posibles cortes expuestos. Para este caso la altura de la garganta (h) ha disminuido provocando un estrechamiento al flujo mayor que en los casos anteriores. Para esta altura h la tubería de menor radio (R) quedó descartada.

2.3. La altura de la garganta (h)

La altura de la garganta de los flujómetros deprimógenos tiene un fuerte efecto en el valor del Δp y por consiguiente, en el valor de las pérdidas de carga permanentes. Al ser el Δp la variable de correlación con el caudal, para un diseño previamente definido, mantiene un fuerte vínculo con los caudales que podrían medirse a partir de haber definido con anterioridad el instrumento que se empleará para medir la diferencia de presión. El valor de h debe seleccionarse con mucho cuidado ya que tiene implicaciones técnicas y económicas, al influir directamente en las $hf_{\text{permanentes}}$ y en la determinación de los caudales mínimos y máximos que podrán medirse. Además para el flujómetro de sector que se está analizando, el valor de h está también ligado al radio (R) de la tubería que genera el sector, ya que tanto R como h tienen incidencia en los ángulos de entrada y salida de la obstrucción creada por el sector circular, figura 2.3 y estos influyen también en las pérdidas de carga permanentes que se producirán.

Todo lo anterior puede resumirse, para un diseño de flujómetro de sector en una conductora de diámetro conocido, en:

- A menor valor de h , se incrementa el valor de las pérdidas de carga permanentes para cada caudal pero se amplía la posibilidad de medir pequeños caudales.
- A mayor valor de h para una tubería interceptora de R conocido, menores ángulos de entrada y salida de la obstrucción y por tanto menores deben ser las pérdidas de carga permanentes.
- Para un valor de h definido previamente, a mayor valor del radio de la tubería interceptora (R), menores serán los ángulos de entrada y salida de la obstrucción y por tanto menores deben ser las pérdidas de carga permanentes.

2.4. Ecuaciones del sector circular

Las variables que se requieren conocer del sector circular que intercepta el tramo de la conductora donde irá colocado el flujómetro son: la longitud del arco (L_a), la longitud de la cuerda (L_c), los ángulos de entrada-salida (θ y β). Estas variables están en función de las dimensiones del diámetro interno de la conductora (D), del radio externo del tramo de tubería que generará el sector circular al interceptarse con la conductora (R) y el valor que se decida la altura de la garganta del flujómetro (h). Por tanto, puede escribirse que:

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{R - D + h}{R} \right) \quad (2.4)$$

$$\theta = 90 + \alpha \quad (2.5)$$

$$\beta = 90 - \alpha \quad (2.6)$$

$$L_c = 2\sqrt{R^2 - (R - D + h)^2} \quad (2.7)$$

$$L_a = 2R\beta \quad (2.8)$$

La longitud de la cuerda definirá la posición de una de las dos tomas de presión, que se emplearán para

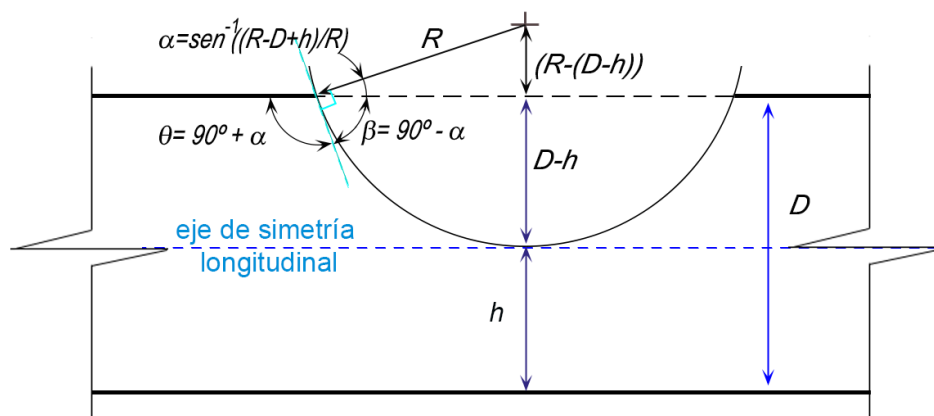


Figure 2.4. Base para la obtención de las variables necesarias del sector circular.

correlacionar el Δp medido con el caudal que circula. La toma de presión aguas arriba (L_{p1}) estará ubicada a una distancia de la sección donde se ubica la garganta (centro de la longitud del arco) igual al valor del diámetro interno de la tubería (L_1), más la mitad de la longitud de la cuerda (L_2), con un error de posicionamiento permisible no mayor de más menos las dos centésimas partes del valor del diámetro interno de la conductora, acorde a lo que aconseja la ISO 5167-6 (International Organization for Standardization (ISO), 2022b). En la imagen se han incluido los espesores tanto de la conductora como de la tubería que genera el sector circular con el fin de detallar bien las distancias acotadas.

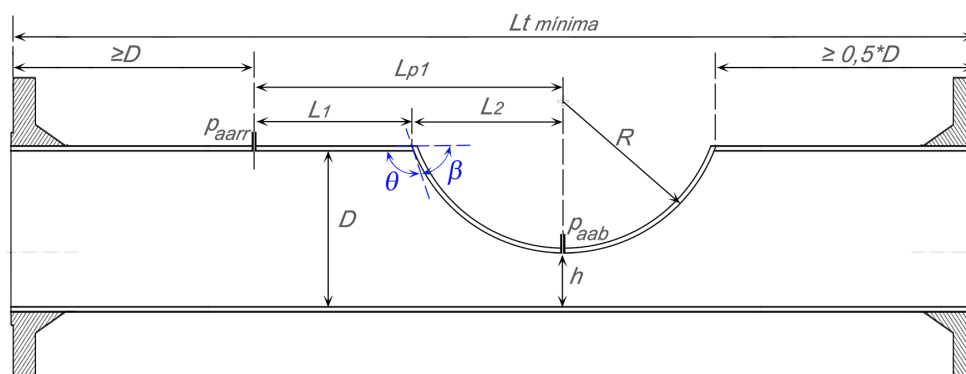


Figure 2.5. Ubicación de las tomas de presión.

La primera disposición de la toma de presión aguas abajo, tal como se indica en la figura 2.5, se ubicará en la sección de la garganta. En esa sección, por ser la de menor área de conducción la velocidad será máxima, lo cual implica que la presión será la mínima que se produce a lo largo del tramo donde va insertado el flujómetro.

03 PRIMEROS RESULTADOS

Para analizar el comportamiento hidráulico de estos flujómetros se empleará como herramienta de trabajo el programa ANSYS que ha demostrado sus fortalezas en estudios anteriormente realizados (León & Chirino, 2024; León et al., 2023; Oficina Nacional de Normalización (NC), 2013).

Para los cuatro diseños a ensayar, se empleará el diámetro de 300 mm como diámetro interno de la conductora y para generar los sectores se tomarán dos diámetros externos: uno de 300 mm ($R = 150$ mm) y otro de 900 mm ($R = 450$ mm).

Esto permitirá emplear para el flujo de entrada, el patrón de distribución de velocidades obtenido en trabajos anteriores (León & Chirino, 2024; León et al., 2023; Oficina Nacional de Normalización (NC), 2013) con lo cual

se consigue minimizar la distancia de ducto aguas arriba del flujómetro, con implicaciones directas en la menor cantidad de elementos necesarios para constituir la malla del modelo matemático. De otra parte, las conclusiones que se obtendrán, en este primer trabajo, son independientes de los valores específicos de los diámetros que se empleen y la relación de 3:1 entre los diámetros exteriores es suficientemente grande como para contrastar los resultados y representar las posibilidades de relaciones de diámetros con la tubería de PE que actualmente se fabrican (Chirino Montano, 2023).

Un detalle importante a señalar, es que para una misma relación de estrechamiento (h/D), cualquiera que este sea, el DSector tiene mayor área mojada en su garganta que el SSector. La figura 3.1 esquematiza esta característica de las secciones circulares.

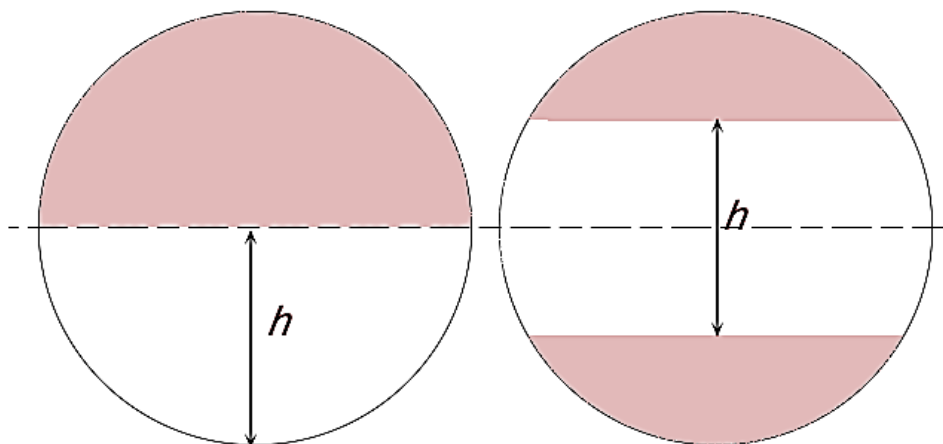


Figure 3.1. Garganta que se produce en el SSector y en el DSector para un mismo valor de (h/D) .

La norma internacional ISO 5167-6 (International Organization for Standardization (ISO), 2022b) resuelve la comparación entre soluciones de flujómetros deprimógenos estableciendo que sean iguales las áreas de las gargantas y de esta forma se pueden evaluar comparativamente los resultados, por ejemplo, entre una Tobera de Radio Largo, el VCone y un flujómetro de Cuña. Por tanto, como altura de la garganta para la variante del SSector, estudiada en este trabajo, se tomará una relación h/D igual a 0,50. Mientras que para la variante estudiada del DSector la altura de la garganta se calculará tal que, las áreas de la obstrucción en los dos casos sean las mismas. En este caso para el DSector se obtiene un resultado de h/D igual a 0,404 para un área de garganta igual a 0,035345 m².

3.1. Primeros resultados con la modelación matemática

En trabajos anteriores sobre flujómetros, se ha detallado la estructura del modelo empleado y se ha demostrado que responde muy bien a las exigencias de calidad del ANSYS para este tipo de modelo (León & Chirino, 2024; León et al., 2023; Oficina Nacional de Normalización (NC), 2013). Más aún, en la calibración realizada del modelo del flujómetro de Cuña (León & Chirino, 2024), tomando como comparación la información brindada por la ISO 5167-6 (International Organization for Standardization (ISO), 2022b) se obtuvieron diferencias muy pequeñas ($< 2,7 \%$ para el Δp_{1-2} y $< 1,9 \%$ para hf), lo cual valida el empleo de esta herramienta con lo establecido para la malla (*mesh*) y para la configuración (*setup*) (León & Chirino, 2024).

3.2. Estructura del modelo

Para el modelo se empleó, al igual que en casos estudiados anteriormente una geometría de tubería circular de 300 milímetros de diámetro interno (D), de interior rugoso con una altura media de rugosidad de 0,15 mm, correspondiente a una tubería de hierro galvanizado nuevo. La longitud total del modelo está conformada por un tramo de entrada hasta el punto donde se mide p_1 , un segundo tramo entre p_1 y una sección (sección 3), ubicada a una distancia igual al diámetro interno del conducto, medido a partir del final del sector, este tramo depende de la longitud de la cuerda del sector. El tercer tramo que va desde la sección 3 hasta la descarga. La longitud del primer tramo fue de 10,00 metros ($\geq 30 \times$ diámetro interno del ducto) y la misma tiene una

dependencia directa con la estrategia que se emplee para suministrar el caudal al modelo. El tercer tramo tiene 12,00 metros de longitud ($\geq 40 \times$ diámetro interno del ducto) que garantiza un restablecimiento de la rasante piezométrica, más una longitud adicional para la estabilidad del patrón de velocidades antes de su salida (León & Chirino, 2024; León et al., 2023; Oficina Nacional de Normalización (NC), 2013).

La estrategia adoptada para la entrada del caudal fue la misma que en anteriores trabajos, empleando un patrón de velocidades previamente obtenido de una tubería idéntica de mucha mayor longitud y sin flujómetro. Esto posibilitó la obtención de un patrón estable para cada velocidad media. Se decidió modelar con un patrón de velocidades parabólico a la entrada con una velocidad media de 3,99 m/s, lo que da como caudal másico de entrada un valor igual a 282,74 kg/s. Esta inusualmente alta velocidad genera un Número de Reynolds igual a 1,34E06, valor que está dentro del intervalo admitido para estos flujómetros.

La alta velocidad adoptada para establecer las comparaciones del Sector con la Cuña y del Sector en sus cuatro diferentes alternativas de diseño, tiene como ventaja que los resultados contrastarán de forma evidente.

Un resumen de los principales parámetros adoptados para el mallado aparece a continuación en la Tabla 3.1. Por su parte, en la Tabla 3.2 se muestran los resultados de la calidad de la malla obtenida para estos primeros resultados.

En la mecánica de fluidos computacional, el modelo de turbulencia k -omega (k - ω) es un modelo de turbulencia de dos ecuaciones, utilizado como cierre de las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds. El modelo predice las características de la turbulencia mediante dos ecuaciones diferenciales parciales de dos variables: k y ω (León et al., 2023). Para este modo de turbulencia los resultados obtenidos anteriormente, brindaron la información necesaria para la selección de los valores iniciales del valor de la energía cinética turbulenta (k) y de la razón específica de disipación de la energía cinética de la turbulencia a energía térmica interna (ω).

Table 3.1. Detalles más relevantes del mallado.

Malla global		Inflación	
Tamaño mínimo	0,002 m	Capas	12
Tamaño máximo de la cara	0,008 m	Altura de la primera capa	0,00025 m
Tamaño máximo	0,015 m	Razón de crecimiento	1,2
Ángulo normal de curvatura	10°		
Dimensionamiento de la silla de montar cilíndrica (Face Sizing)			
Tamaño de los elementos	0,002 m	Comportamiento	fuerte

Table 3.2. Calidad del mallado.

Indicador	Intervalo	Modelo
Calidad de elementos (Element Quality)	1 óptimo, 0 pésimo	Media = 0,77; Desv. típica = 0,37
Relación de aspecto (Aspect Ratio)	1 óptimo; mientras sea > 1 es peor; menor que 100 es aceptable	Media = 4,65; Desv. típica = 9,76
Relación Jacobiana (Jacobian Ratio)	1 óptimo; buena calidad entre 1 y 10	Media = 1,01; Desv. típica = 0,009
Asimetría (Skewness)	de 0 a 0,25 excelente; de 0,25 a 0,5 bueno	Media = 0,17; Desv. típica = 0,12
Calidad ortogonal (Orthogonal Quality)	0,95 a 1 excelente; 0,70 a 0,95 muy bueno	Media = 0,91; Desv. típica = 8,67E-02
Desviación paralela (Parallel Deviation)	0 ideal; 70 aceptable	Media = 4,69; Desv. típica = 5,83

La ejecución de cada modelo se prolongó hasta que la raíz cuadrada del valor medio del cuadrado de los residuos

de las componentes de la velocidad (Root Mean Square, RMS) fueran menor que una millonésima ($1,0\text{E-}06$).

3.3. Resultados iniciales para la distribución de la velocidad y la presión

Sin pretender dar conclusiones finales sobre este flujómetro, se expondrán y analizarán los primeros resultados obtenidos, para, a partir de ellos, dar una primera respuesta a tres interrogantes: la reducción de las pérdidas de carga permanentes respecto al flujómetro de Cuña, la diferencia entre el SSector y el DSector y las ventajas iniciales que presenta el empleo de mayores diámetros de tubería para crear el sector.

Para el análisis, utilizando el corto espacio que permite este primer trabajo, se empleará una tubería de diámetro interior 300 mm interceptada, primero, por otra tubería de diámetro exterior 300 mm y posteriormente interceptada por una tubería de radio exterior de 900 mm. Tanto para el SSector como para el DSector, se empleará a la entrada un patrón de velocidades parabólico con una velocidad media de $3,995 \text{ m/s} \approx 4,0 \text{ m/s}$. La figura 3.2 muestra los primeros resultados visuales de la modelación para la velocidad y la presión estática.

En las figuras 3.2a, 3.2b, 3.2e y 3.2f, la relación entre el diámetro interno del conducto (D_{ducto}) y el diámetro externo de la tubería que genera el sector (D_{sector}) es igual a la unidad ($D_{ducto}/D_{sector} = D_r = 1$). Mientras que en la figura 3.2c, 3.2d, 3.2g y 3.2h la relación es 0,333 ($D_r = 0,333$).

Un primer análisis de los patrones de velocidad queda claramente establecido, que para el SSector con $D_r = 1$ (Fig. 3.2a), las zonas de bajas velocidades y fuertes cambios en la dirección del vector velocidad, abarcan mucha más área en comparación con igual solución pero con $D_r = 0,333$ (Fig. 3.2c). Lo mismo ocurre en el caso del DSector, donde también aparece una diferencia entre la solución generada con $D_r = 1$ en contraste con la solución generada con $D_r = 0,333$. En esta última, las zonas de bajas velocidades y cambios en la dirección del vector velocidad, abarcan mucha menos área lo cual indica que la expansión del flujo es menos brusca.

En todos los casos la velocidad media en la garganta es $\approx 8,0 \text{ m/s}$, ya que el área de la garganta es la mitad del área de la sección del conducto. En el caso de la distribución de velocidades en la garganta, aunque cualitativamente es semejante en los cuatro casos estudiados, la velocidad máxima en la vertical difiere de un caso a otro. En la Tabla 3.3 aparece, en una de las columnas el valor de la velocidad máxima en la garganta. Debido a la contracción del flujo al pasar por la garganta el mayor valor aparece en la solución SSector con $D_r = 1$.

Table 3.3. Valores de velocidad y presión de las diferentes soluciones.

Tipo	Característica	h/D	p_{2min} (mca)	$v_{max_garganta}$ (m/s)	Δp_{1-2} (mca)
Cuña ISO 5167-6	Cuña a 45°	0,500	-1,86	9,78	4,91
SSector	300x300 mm	0,500	-2,91	9,08	4,27
SSector	300x900 mm	0,500	-1,96	8,54	3,32
DSector	300x300 mm	0,404	-2,41	8,47	3,45
DSector	300x900 mm	0,404	-2,00	8,33	2,91

Al comparar los patrones de distribución de las presiones de las soluciones (Fig. 3.2b, 3.2d, 3.2f y 3.2h) y analizar la presión mínima (p_{2min}) que cada solución genera en el punto de medición aguas abajo, ubicado en la garganta, se nota un comportamiento menos abrupto en los cambios de presión tanto a lo largo del tramo del flujómetro como en una sección vertical por la garganta del estrechamiento en los dos casos en que D_r es igual a 0,333. Si además se analizan los valores de Δp_{1-2} que aparecen en la Tabla 3.3, también para esas dos soluciones se obtienen las menores diferencias.

Es muy importante tener en cuenta el valor Δp_{1-2} en los flujómetros deprimógenos, ya que define el caudal mínimo que podrá medirse con el instrumento secundario que se emplee para medir la presión (manómetro Bourdon diferencial, sensor digital de presión diferencial, rama manométrica u otro similar), ecuación (2.2). Para este análisis el mayor valor se obtiene con el SSector y $D_r = 1$ y el menor con el DSector y $D_r = 0,333$.

Por último, la Tabla 3.4 muestra los valores de las pérdidas de carga permanentes para cada una de las soluciones analizadas y la comparación de esta con la que produce, en las mismas condiciones, un flujómetro de Cuña (Wedge meter) en su diseño convencional (International Organization for Standardization (ISO), 2022b).

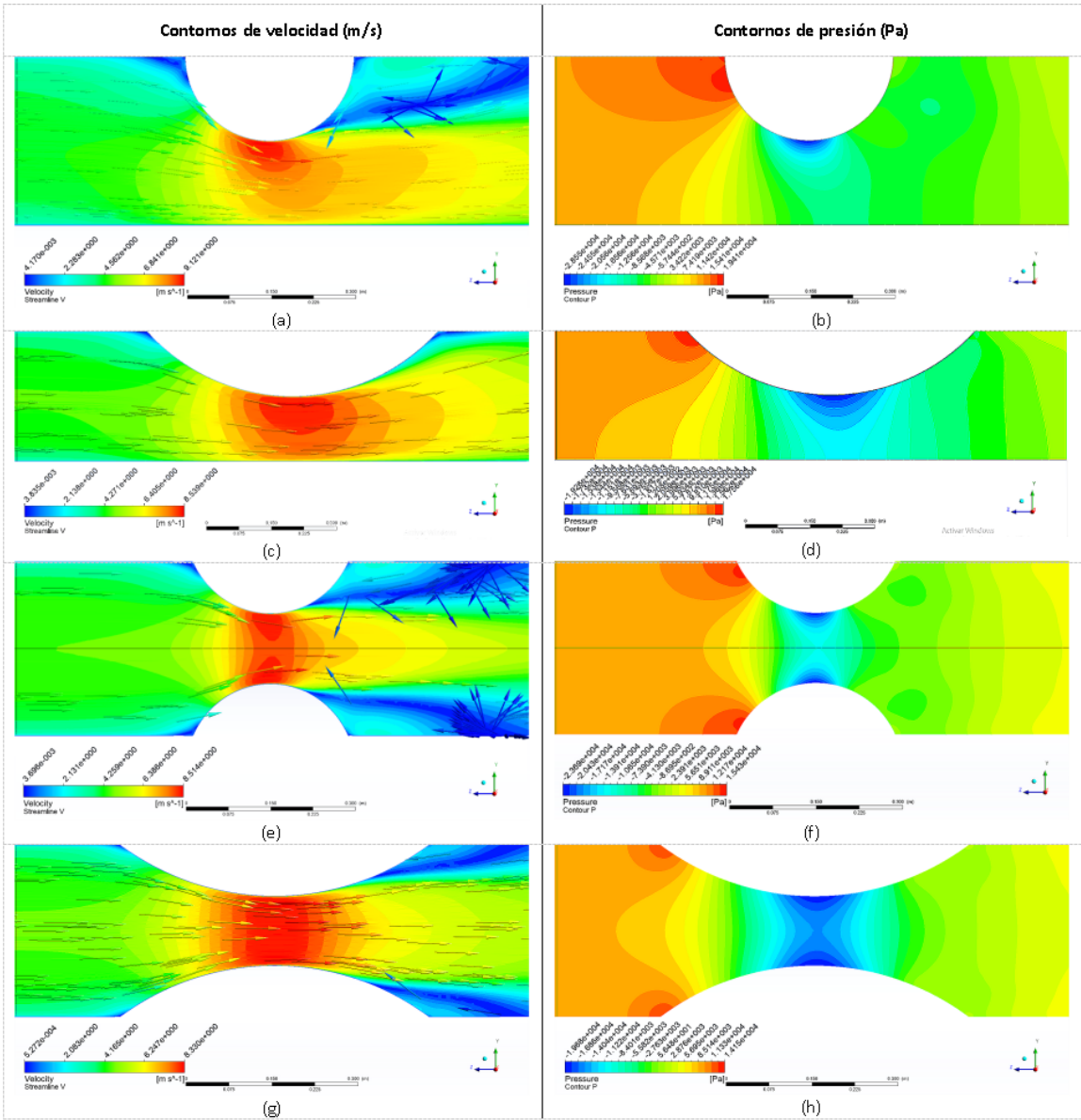


Figure 3.2. Mosaico mostrando los primeros resultados de los modelos.

Table 3.4. Comparación de las pérdidas de carga permanentes de las diferentes soluciones.

Tipo	Característica	h/D	h_f permanentes (m)	Reducción de h_f respecto a la Cuña (%)
Cuña ISO 5167-6	Planos a 45°	0,500	2,605	—
SSector	300x300 mm	0,500	0,817	68,64
SSector	300x900 mm	0,500	0,679	73,93
DSector	300x300 mm	0,404	0,484	81,42
DSector	300x900 mm	0,404	0,374	85,64

Al analizar los resultados de la Tabla 3.4, es significativa la reducción de las pérdidas de carga de cualquiera de las variantes del flujómetro de Sector respecto al flujómetro de Cuña. Además, hay una lógica indiscutible respecto al comportamiento de hf en los casos estudiados del Sector: a menor valor de D_r , menor valor de la hf , y, para un mismo valor de D_r , DSector reduce las pérdidas de carga permanentes a casi la mitad del valor para las condiciones estudiadas.

Todas las soluciones analizadas tienen muy bajas pérdidas de carga permanentes, lo cual representa una gran fortaleza para este flujómetro. Solo a manera de comparación con los dos deprímógenos líderes en bajas pérdidas de carga, el Tubo Venturi (International Organization for Standardization (ISO), 2003) y la Tobera Venturi (International Organization for Standardization (ISO), 2022a), evaluados para las mismas condiciones de tubería y caudal, presentan valores de las pérdidas de carga permanentes de 0,32 metros y 0,43 metros respectivamente, valores muy similares a los obtenidos con el DSector y D_r igual a 0,333.

Analizando otro aspecto de los resultados, la solución de DSector con D_r igual a 0,333 es la que menor diferencial de presión tiene, mientras que la solución con D_r igual a la unidad tiene el segundo mayor valor para el diferencial de presión entre las tomas 1 y 2, lo que implica mayor sensibilidad para pequeños caudales. Este resultado ubica a esta solución como una buena opción para balancear $hf_{\text{permanentes}}$ mínimas y Δp_{1-2} alto.

Para terminar este primer trabajo sobre estos flujómetros, se presenta en la figura 3.3, un contraste de la diferencia entre las pérdidas de carga generadas por el flujómetro Cuña y su similar del SSector con un D_r igual a 1, a través de los contornos de la Energía Cinética Turbulenta (TKE) y la Frecuencia de los Remolinos Turbulentos (TEF). Se ha incluido, además, una representación de los vectores velocidad en dirección y sentido para reforzar la comprensión de las diferencias entre las dos alternativas.

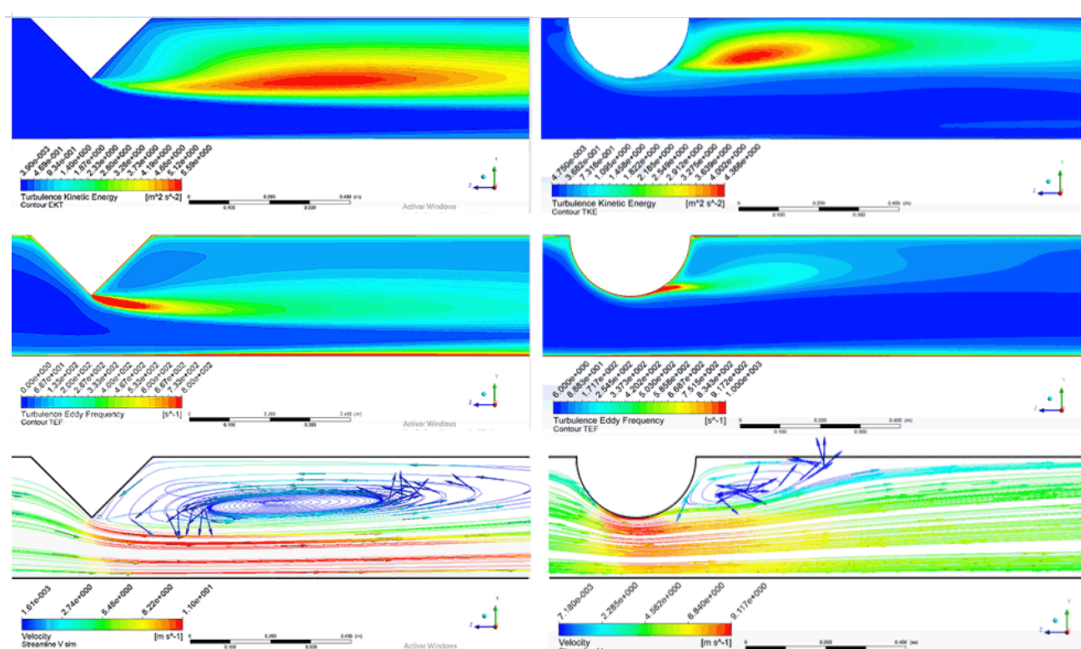


Figure 3.3. Comparación de la disipación de energía entre el flujómetro de Cuña y el SSector.

La relación entre las pérdidas de carga locales, la Energía Cinética Turbulenta (TKE) y la Frecuencia de los Remolinos (TEF) es directa y causal. TKE representa la energía asociada a las fluctuaciones turbulentas de la velocidad. En una obstrucción, el flujo se acelera y se generan fuertes gradientes de velocidad, por lo tanto, una alta producción de turbulencia arroja valores altos de TKE que implican altos valores de la intensidad turbulenta local. En los modelos de turbulencia de dos ecuaciones (como $k-\varepsilon$ o $k-\omega$), la TEF está relacionada con la tasa de disipación de la turbulencia (ε) o la frecuencia específica (ω). Una alta frecuencia significa remolinos pequeños y rápidos que disipan energía rápidamente; una baja frecuencia significa remolinos grandes y persistentes.

La obstrucción genera turbulencia debido a la aceleración del flujo (Fig. 3.3 inferior derecha e izquierda). Esto

crea un gradiente de presión adverso aguas abajo que provoca que el flujo se desprege de la pared, formando una zona de recirculación que implica la formación de remolinos estacionarios grandes. Como consecuencia de esto en la capa de mezcla entre el chorro central de alta velocidad y la zona de recirculación de baja velocidad, se genera una enorme cantidad de Energía Cinética Turbulenta (TKE), con valores máximos en el caso de la Cuña de $5,59 \text{ m}^2/\text{s}^2$, en contraste con las del SSector que alcanzan un máximo de $4,36 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Por otra parte es visualmente evidente, figura 3.3, que el área ocupada por bajos valores de TKE en la Cuña es muy superior a la ocupada en el SSector.

La TKE producida en los grandes remolinos (baja frecuencia), se transfiere a remolinos cada vez más pequeños (alta frecuencia), mediante el proceso denominado cascada de energía. Finalmente, los remolinos más pequeños (de alta frecuencia) son disipados por la viscosidad del fluido (disipación viscosa), convirtiendo la energía cinética del flujo en calor (Melamed & Filippov, 2019; Moffatt, 1991).

Las pérdidas de carga locales es la energía que pierde el flujo principal (presión) para generar y mantener esta turbulencia hasta que se disipa (Melamed & Filippov, 2019; Moffatt, 1991; Toapanta-Ramos et al., 2019). La comparación entre los flujómetros de Cuña y la variante del SSector, que aparece en la figura 3.3, esclarece la gran diferencia que aparece reflejada en la Tabla 3.4. Por lo tanto: a mayor TKE generada en la obstrucción, mayor cantidad de energía extraída del flujo y mayor pérdida de carga (Fig. 3.3 superior derecha e izquierda). Como complemento a lo anterior puede decirse que a mayor frecuencia de remolinos en la zona de disipación, aguas abajo, habrá una mayor tasa de disipación de esa TKE y la energía se pierde más rápidamente, pero la cantidad total de pérdida de carga ya está determinada por la TKE generada (Fig. 3.3 media derecha e izquierda).

04 CONCLUSIONES

Como conclusión a este primer trabajo, todas las soluciones analizadas tienen muy bajas pérdidas de carga permanentes, lo cual representa una gran fortaleza para este flujómetro. Solo a manera de comparación los dos deprimógenos líderes en bajas pérdidas de carga, la Tobera Venturi y el Tubo Venturi, presentan para las mismas condiciones, pérdidas de carga permanentes ligeramente menores a las obtenidas con el DSector con D_r 0,333.

Las dos variantes de doble sector (DSector) presentan una pérdida de carga permanente pequeña, aun con un alto caudal (Número de Reynolds $\approx 1,34\text{E}06$) y para estas condiciones la que tiene D_r igual a la unidad es la segunda mejor respecto al Δp_{1-2} entre los puntos para correlacionarlo con el caudal. Además, la reducción de las pérdidas de carga permanentes respecto al Flujómetro de Cuña es muy notable.

Debe destacarse que la variante de flujómetro presentada reúne características de robustez, facilidad constructiva y factibilidad de ser desarrollada por la industria cubana de tuberías de PE, o en cualquier taller donde se maquinen tuberías de hierro galvanizado o acero. Y puede ser empleada, además de como flujómetro, como parte de un flujómetro proporcional, como elemento para airear el flujo y como parte de los elementos para la inyección de sustancias solubles en la corriente líquida.

05 REFERENCIAS

- Chirino Montano, J.** (2023). *Estudio de la influencia de modelos rans en la modelación de un flujo a través de una obstrucción. caso de estudio en caudalímetro de cuña* [Trabajo de diploma]. Centro de Investigaciones Hidráulicas, Universidad Tecnológica de La Habana, CUJAE.
- Idel'cik, I. E.** (1969). *Mémento des pertes de charge: Coefficients de pertes de charge singulières et de pertes de charge par frottement*. Éditions Eyrolles.
- International Organization for Standardization (ISO).** (2003). *Iso 5167-4. measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full — part 4: Venturi tubes* (tech. rep.). ISO. Ginebra, Suiza.

- International Organization for Standardization (ISO).** (2022a). *Iso 5167-3. measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full — part 3: Nozzles and venturi nozzles* (tech. rep.). ISO. Ginebra, Suiza.
- International Organization for Standardization (ISO).** (2022b). *Iso 5167-6. measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full — part 6: Wedge meters* (tech. rep.). ISO. Ginebra, Suiza.
- León, A. J., & Chirino, J.** (2024). Evaluación con técnicas cfd de un flujómetro de cuña. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, XLV(3). <https://riha.cujae.edu.cu/index.php/riha>
- León, A. J., Stefano, E., & Chirino, J.** (2023). Reducción de longitudes de tubería en la simulación cfd de flujos a través de accesorios. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, XLIV(3). <https://riha.cujae.edu.cu/index.php/riha>
- Melamed, L. E., & Filippov, G. A.** (2019). Concepto de relleno de vórtice turbulento: Modelos y métodos. *Boletín de Instituciones de Educación Superior. Problema de Ingeniería Energética*, 21(5), 97–109. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-5-97-109>
- Moffatt, K.** (1991). Turbulencia y procesos estocásticos: Las ideas de kolmogorov 50 años después. *Proceedings of the Royal Society A*, 434, 1–240. <https://doi.org/10.1017/S0022112094212417>
- Mott, R. L.** (2006). *Mecánica de los fluidos* (6th ed.). Pearson Education.
- Oficina Nacional de Normalización (NC).** (2013). *Nc 969:2013. tuberías presurizadas de polietileno — especificaciones para el cálculo, diseño, transportación, manipulación, almacenamiento y colocación* (tech. rep.). Oficina Nacional de Normalización. La Habana, Cuba.
- Toapanta-Ramos, L. F., Zapata-Cautillo, J. A., Cholango-Gavilanes, A. I., Quitiaquez, W., Nieto-Londoño, C., & Zapata-Benabithé, Z.** (2019). Estudio numérico y comparativo del efecto de turbulencia en codos y dobleces para distribución de agua sanitaria. *Facultad de Ingeniería*, 28(53), 101–118. <https://doi.org/10.19053/01211129.v28.n53.2019.10156>

Conflicto de intereses

No hay conflicto de intereses.

ORCID de los autores

Alcides J. León Méndez <https://orcid.org/0000-0002-5072-6438>

Estudio de la dureza total del agua a la entrada de la Planta Potabilizadora de Agua “El Ceibal”

Juan Gabriel Chipantiza MasabandaE-MAIL: jchipantizm2@uteq.edu.ec

Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Facultad de Ciencias Agrarias (UTEQ). Quevedo, Ecuador.

Evelin Laura ZambranoE-MAIL: ezambranoa8@uteq.edu.ec

Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Facultad de Ciencias Agrarias (UTEQ). Quevedo, Ecuador.

Teresita de Jesús RomeroE-MAIL: teresita@cih.cujae.edu.cu

Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE), Cuba.

Odalys Méndez ValdésE-MAIL: omendez@ahabana.co.cu

Empresa Aguas de La Habana. La Habana, Cuba.

RESUMEN

El presente trabajo investigativo tiene como objetivo, la realización del estudio de la calidad del agua a lo largo del río Portoviejo desde la salida del embalse Poza Honda hasta la llegada a la Planta Potabilizadora de Agua (PPA) “El Ceibal”. Se identifican los principales aportes, determinando además los efectos que causan las elevadas concentraciones de dureza en las comunidades de Manta, Montecristi, Rocafuerte, Jaramijó, con 310 443 habitantes, que corresponde a la tercera parte de toda la provincia de Manabí, así como a otros sitios que son abastecidos por la misma fuera de la provincia. Para la investigación se realiza muestreo a lo largo del cauce de diferentes parámetros físico-químicos, comparación de los resultados, e identificación de las zonas contaminantes. Se estudia además el impacto directo en la calidad del agua cruda para su tratamiento con la potabilizadora existente y encuestas que permiten conocer la percepción de la problemática por la comunidad. Como resultado se propone una serie de acciones para el control de la calidad del agua y la reducción de la contaminación local cuyo éxito depende de la integración inter y multidisciplinaria de los actores de la cuenca y los organismos rectores.

PALABRAS CLAVE: *Planta El Ceibal, Poza Honda, Manta, Rocafuerte, captación, modelo*

Study of the total hardness of water at the entrance of the “El Ceibal” Water Treatment Plant

ABSTRACT

This research work aims at the study of water quality along the Portoviejo River from the outlet of Poza Honda reservoir until arrival at the Water Treatment Plant (PPA) “El Ceibal”. The main contributions are identified, also determining the effects caused by elevated levels of hardness in the communities of Manta, Montecristi, Rocafuerte, Jaramijó, with 310,443 inhabitants, corresponding to one third of the province of Manabí, as well as other sites that are supplied by the same plant outside the province. For the research, sampling of different physicochemical parameters along the channel, comparison of results, and identification of contaminant areas was carried out. The direct impact on the quality of raw water for treatment with the existing water treatment plant, and surveys to determine the perception of the problem by the community, were also studied. As a result, a number of actions to control water quality and reduce local pollution is proposed, whose success depends on the inter- and multidisciplinary integration of watershed stakeholders and governing bodies.

KEYWORDS: *El Ceibal plant, Poza Honda, Manta, Rocafuerte, catchment, model*

01 INTRODUCCIÓN

Las implicaciones de consumir agua contaminada son variadas; en el contexto de salud pública, la Organización Mundial de la Salud (OMS) calcula que aproximadamente un 80 % de todas las enfermedades y más de una tercera parte de las defunciones en los países en desarrollo tienen su causa en enfermedades de origen hídrico, ya que alrededor del 70 % es consumida directamente por humanos en zonas rurales altamente contaminada por heces fecales (Organización Mundial de la Salud, 2004).

La disponibilidad del recurso agua en calidad y suficiencia representa el mayor problema con que se enfrentará la humanidad en los próximos años. En los países con escasa disponibilidad, la situación se volverá más aguda. El vertido de residual doméstico, produce una serie de alteraciones en los ríos y lagos debido a los diversos productos que contienen, las áreas receptoras son cada vez menos capaces de asimilarlas. El problema entonces, se hace similar tanto en las aguas continentales como en las marinas próximas a las costas.

La expansión urbana y el aumento del consumo hídrico consecuente, ha provocado un crecimiento proporcional de contaminación. Entre un 70 y 80 % de las aguas recibidas a nivel domiciliario se transforman en residuales vertiéndose en las redes de saneamiento, si las hay, o en drenajes de diversos tipos, para terminar engrosando los cuerpos de agua naturales. Del mismo modo, las utilizadas por la industria, ya sea para ser consumidas en los propios procesos en actividades como enfriado o en la limpieza, también se vierten en las redes y canales de desagüe, culminando su itinerario en ríos, lagos y mares (Seoáñez, 1995).

Esta situación está transformándose gradualmente en un problema crítico en muchas partes del mundo. En ciertas áreas densamente pobladas los volúmenes vertidos exceden en mucho las posibilidades de recepción de los cursos de agua, lagos y ambientes litorales o estuarios. El resultado es una degradación creciente y la destrucción de los recursos biológicos que de ellos dependen. Este problema se ha vuelto común en todas las grandes urbes de América Latina, África y Asia. En Ecuador, la provincia de Manabí no es la excepción.

Cuando la precipitación es suficiente, el volumen de agua superficial es tal que los arrastres hasta la red de evacuación y aportes de los componentes extraños, se diluyen en lo que constituye un proceso de depuración. Los acuíferos también están expuestos a contaminación, tanto por infiltración desde suelo contaminado como por fugas a través de tuberías del sistema de evacuación, todo lo cual puede afectar su composición.

De acuerdo con lo anteriormente expuesto, se aprecia que existen varias fuentes y procesos que atentan contra la calidad del agua, lo que debe ser estudiado dentro de cada contexto de forma responsable, con el fin de reducir los niveles de afectación a la sociedad y garantizar el uso responsable para preservar el recurso para el presente y las generaciones futuras.

02 MÉTODOS

La cuenca del río Portoviejo está localizada en la región central de la provincia de Manabí y ocupa de manera total o parcial cuatro cantones y drena un área de 2060 km², lo que representa el 11 % del área total de la Provincia de Manabí. El río nace en la cordillera costanera a una altitud de 420 msnm y fluye a lo largo de 132 km de longitud hasta su desembocadura en el Océano Pacífico. Este afluente natural es la fuente de agua más importante para la región central de Manabí ya que abastece a más de 800 000 personas en ciudades como Portoviejo, Santa Ana, Rocafuerte, Sucre e incluso a otras fuera de su cuenca como son Manta, Montecristi, Jaramijó y Jipijapa (Cevallos, 2009).

2.1. Caracterización de la zona de estudio

La provincia de Manabí, con superficie de 18 878,8 km², cuenta con una red hidrográfica amplia y pocos ríos perennes, entre los que se destacan los ríos Portoviejo, Chone y Carrizal. El río Portoviejo que influye en un área de 2 076,68 km² nace en su cuenca alta en el embalse de Poza Honda hasta la parroquia Lodana. La cuenca media comprende desde Lodana hasta la parroquia Mejía del cantón Portoviejo, y la cuenca baja que va desde

Mejía hasta la desembocadura en el océano Pacífico. Algunos reportes aislados de análisis químicos de aguas en Manabí, señalan restricción en su uso, debido a la presencia de anhídrido carbónico, sodio, sulfatos y cloruros (Matato et al., 2009).

Los ríos proveen la mayor parte del agua (98,4 %) que se utiliza en las cuencas del río Portoviejo. En la cuenca del río Portoviejo, existen 106 concesiones por un caudal total de 8,6 m³/s, de los cuales se estima que son netamente aprovechados unos 3,8 m³/s. El riego representa el 80,5 % de la demanda y el consumo humano el 18,3 % (1,57 m³/s); la mayor parte de esta demanda es para las ciudades de Portoviejo y Manta.

2.2. Planta Potabilizadora de Agua "El Ceibal"

La PPA "El Ceibal", está ubicada en el Cantón Rocafuerte, en el sitio conocido como El Pueblito, en el kilómetro 15,5 de la vía Portoviejo-Crucita, en la parte centro-oeste de la provincia. La misma está diseñada para un caudal de entrada de 90 000 m³/día.

2.3. Dureza total del agua de la planta

Para el estudio se partió de recopilar los datos de control existentes de los años 2010 al 2013, en cada uno de los meses del año. Estos datos abarcan un período de cuatro años de trabajo de la PPA "El Ceibal", donde los registros mensuales de dureza permiten realizar un análisis comparativo en las distintas estaciones del año, observándose como del año 2010 al 2014 la dureza total ha ido incrementándose para los mismos meses, por ejemplo en enero del 2010 la dureza total era 380 mg/L, parámetro que en el mismo mes del 2013 se encontraba en 674 mg/L. Igual resulta significativo que en el año 2013 la dureza total a la entrada de la PPA "El Ceibal" se ha incrementado notablemente siendo el valor mínimo de 487 mg/L contando con valores extremos de hasta 999 mg/L, esta información es fundamental como punto de partida de la problemática a estudiar.

2.4. Esquema de muestreo y análisis

El muestreo y análisis constituyó la actividad fundamental en el diseño de la investigación con el objetivo de garantizar la representatividad de los datos para que tributarán a una información confiable, lo que permitió desarrollar el estudio y llegar al diagnóstico propuesto.

Selección de los puntos de muestreo

Para la selección de los puntos de muestreo se tuvo en cuenta la representatividad de los sitios, considerando como aspecto para la selección la influencia de los vertidos en los afluentes del río Portoviejo, en la calidad del agua que llega a la PPA "El Ceibal". El cauce del río Portoviejo, desde su nacimiento hasta el sector del sitio "El Ceibal", se encuentra ubicado en la zona central de la provincia de Manabí (Región Costa) de la República del Ecuador, a una altitud media de 40 msnm, con temperatura media anual de 25 °C. Las zonas de interés para el muestreo fueron: aguas abajo del embalse Poza Honda; afluentes del río; y aguas arriba de la PPA "El Ceibal".

Teniendo en cuenta lo anterior se definieron 14 puntos para la toma de muestra simple, que abarcaron desde la salida del embalse hasta la captación del agua de la planta. En estos se tomaron las muestras "in situ" que sirvieron de base para la selección de los 10 puntos (muestra compuesta) que se emplearían para el muestreo y análisis.

03 RESULTADOS

Las tareas realizadas tributaron a los resultados que se presentan en este acápite, que van desde el análisis en laboratorio a las muestras tomadas en los diferentes puntos hasta el tratamiento de la información obtenida a partir de las encuestas a la población abastecida.

3.1. Análisis de los resultados del monitoreo de la calidad del agua en verano

La Tabla 3.1 muestra el resultado de los análisis realizados en el mes de febrero (verano), para cada uno de los 10 puntos de muestreo de agua cruda seleccionados a lo largo del río, con el objetivo de estudiar su calidad para el tratamiento disponible en la potabilizadora. Las concentraciones de dureza son mucho mayores que el límite

máximo permisible establecido en la Norma Ecuatoriana de 300 mg/L, lo que gana mayor importancia al tener en cuenta que la PPA “El Ceibal” no cuenta con línea de ablandamiento.

Table 3.1. Comportamiento de parámetros físico-químicos del agua cruda, febrero/2014 (verano).

Parámetro	P1	P2	P5	P7	P8	P9	P11	P12	P13	P14
Turbiedad (NTU)	21,4	29,4	16,4	17	20,9	7,43	14,7	2,21	23,8	5,03
Color (U. Pt-Co)	179	187	131	166	150	58	99	31	182	31
Temperatura (°C)	26,8	28,2	27,8	28,8	30,9	30,3	31,7	28,2	29,6	28,8
Conductividad eléctrica (μS/cm)	200	208	238	312	464	5870	1641	1604	910	1631
Sólidos disueltos totales (mg/L)	132,3	133,3	158,1	239,4	149,6	2760	714	799	497	773
pH	6,84	6,84	7,3	7,23	7,23	8	7,34	7,27	8,23	7,7
Dureza total (mg/L)	90	87	100	130	177	2050	535	423	335	535
Dureza de carbonatos (mg/L)	90	87	100	130	156	350	220	236	184	220
Dureza de no carbonatos (mg/L)	0	0	0	0	21	1700	315	187	151	315
Calcio (mg/L)	26	34,8	27,2	26,4	18	230,4	40	22	14	14
Magnesio (mg/L)	6,07	0	7,77	15,5	32	358,4	105,7	89,4	72,9	121,5
Alcalinidad total (mg/L)	96	88	106	190	156	350	220	236	184	220
Cloruros (mg/L)	7,1	7,1	14,2	14,2	14,2	269,8	49,7	184,6	42,6	127,8
Hierro (mg/L)	0,21	0,28	0,15	0,21	0,16	0,09	0,11	0,06	0,1	0,04
Manganeso (mg/L)	0,03	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Sulfatos (mg/L)	17	15	21	37	62	976	294	252	210	240

ND: No definido.

De acuerdo con los resultados obtenidos se puede señalar que: el punto 1, a la salida del embalse Poza Honda, presenta los parámetros de calidad adecuados para su tratamiento; los puntos del 2 al 8 cuentan con un comportamiento estable; el punto 9 (Estero Lodana, 10 km aguas abajo de Santa Ana) es el más crítico, con una dureza total de 2050 mg/L, dada fundamentalmente por el incremento significativo de la dureza no carbonatada (permanente); los puntos 11 y 12 (Compuerta Mejía y Río Chico) también tienen niveles elevados; el punto 13 es un afluente con calidad adecuada; y el punto 14 corresponde al agua cruda que llega a la PPA “El Ceibal”, donde aunque ha habido dilución, la dureza del agua todavía es elevada (535 mg/L de CaCO₃), por encima del máximo permisible.

3.2. Análisis de los resultados del monitoreo de la calidad del agua en invierno

El muestreo en invierno se realizó en dos momentos (meses de marzo y abril). La Tabla 3.2 muestra el resultado detallado del muestreo de invierno para cada uno de los 10 puntos seleccionados en el mes de marzo. En este período igualmente el punto donde se dan concentraciones extremas es el 9 (Estero Lodana), con un comportamiento similar al del verano.

Table 3.2. Comportamiento de parámetros físico-químicos del agua cruda, marzo (invierno).

Parámetro	P1	P2	P5	P7	P8	P9	P11	P12	P13	P14
Turbiedad (NTU)	21,4	29,4	16,4	17	20,9	7,43	14,7	2,21	23,8	5,03
Color (U. Pt-Co)	141	157	92	51	75	64	75	81	50	86
Temperatura (°C)	27,1	27,4	27,5	28,6	28,1	28	28,1	27,5	27	27,2
Conductividad eléctrica (μS/cm)	185	197	212	1072	1181	5488	1712	1280	528	777
Sólidos disueltos totales (mg/L)	127,4	130,1	135,7	563	597,1	2694	1056	757	285	375
pH	6,8	7,1	7,15	7,66	7,78	8,1	7,81	7,8	7,2	7,74
Dureza total (mg/L)	81	132	273	440	487	1954	862	561	211	402
Dureza de carbonatos (mg/L)	78	87	125	204	193	347	327	283	104	150
Dureza de no carbonatos (mg/L)	2	45	148	236	294	1607	535	278	107	252
Calcio (mg/L)	20,4	34,8	45,2	96,2	122	216	82	54,4	8,6	9,5
Magnesio (mg/L)	8,2	12,3	43,7	64,4	50	386,5	179,7	62,4	51,7	83,8
Alcalinidad total (mg/L)	78	87	125	204	193	347	327	283	104	150
Cloruros (mg/L)	7,1	7,1	14,2	35	45,9	224,1	115	142	42,6	61
Hierro (mg/L)	0,18	0,18	0,15	0,01	ND	0,03	0,02	0	0	0

3.3. Comparación de parámetros en Estero Lodana (Punto 9)

El estudio realizado centra el problema de dureza en la zona de Estero Lodana, por lo que resulta de interés realizar un análisis comparativo de los resultados de la dureza en los tres muestreos (1 de verano y 2 de invierno), donde los valores de los parámetros objeto de estudio son extremos. Este punto recibe los aportes provenientes de la subcuenca Santa Ana que aporta al río las mayores concentraciones de dureza total, sólidos disueltos totales, conductividad y sulfatos aguas abajo del mismo.

Según se aprecia en la Figura 3.1, las concentraciones de dureza son altas, la dureza total va desde 1954 mg/L hasta 2050 mg/L, que está condicionada fundamentalmente por la influencia de la dureza no carbonatada cuyos valores están entre 1607 mg/L y 1700 mg/L. Es importante señalar que en todos los momentos estas concentraciones incumplen la Norma Técnica Ecuatoriana (Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN), 2011).

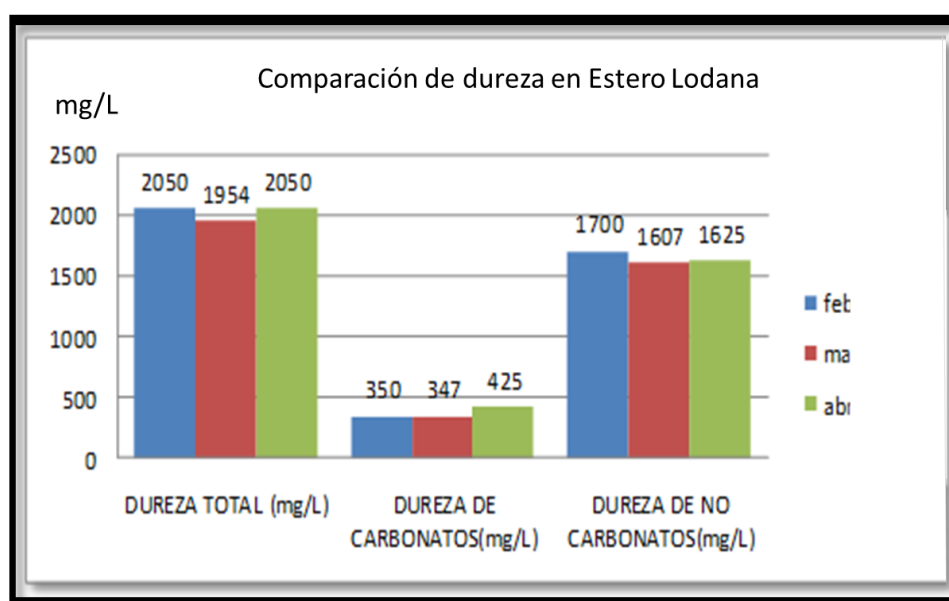


Figure 3.1. Gráfico de dureza en Estero Lodana.

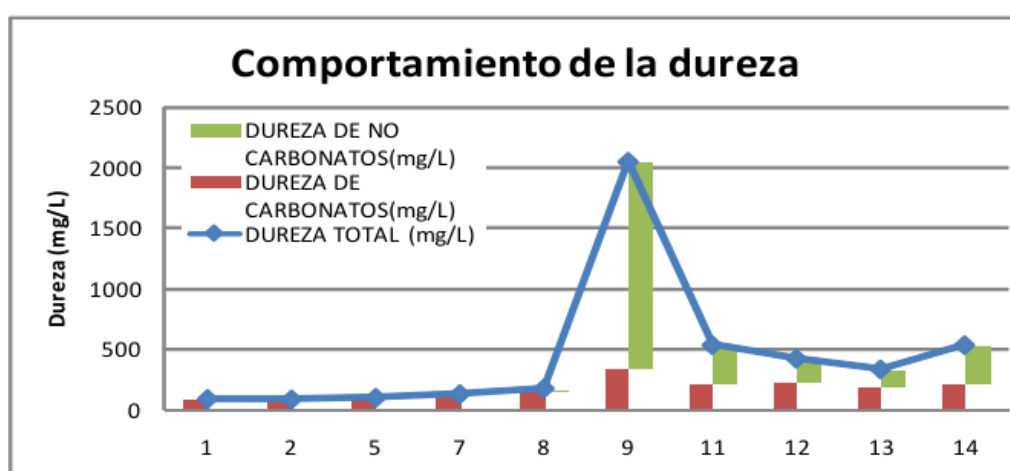


Figure 3.2. Dureza total a lo largo del río.

De forma general, en la Figura 3.2 se observa que las concentraciones de dureza en el punto 9 son elevadas, fundamentalmente por lo elevado de la dureza no carbonatada, lo que llevó a la revisión de las características

de la zona de aportes, coincidiendo con sistemas de riego, por lo que puede deducirse que este comportamiento está relacionado con la actividad característica de la subcuenca Santa Ana, que es eminentemente agrícola.

3.4. Análisis de la conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales

Se realiza un análisis estadístico del comportamiento de los parámetros y la relación entre ellos, obteniéndose las mayores desviaciones estándar en los parámetros de conductividad eléctrica (1718 mg/L) y sólidos disueltos totales (797 mg/L). Esta desviación significa en cada caso la diferencia de concentración con respecto a la media de las muestras estudiadas. Analizando la serie se observa en el punto 9 un comportamiento diferente a las características del agua que aporta el río, por lo que el incremento en Estero Lodana es atribuible a una contaminación de carácter local, vinculada a intervenciones antrópicas relacionadas con la actividad de riego, ya que la conductividad es un indicio de ingresos de fertilizantes inorgánicos, así como está relacionado con la concentración de iones cloruros, sulfatos y potasio en las actividades agrícolas.

Las consideraciones que apoyan lo anterior son: existen polígonos experimentales en zonas como la Teodomira que, según la consulta bibliográfica (Curia & Suárez, 2011), cuentan con experimentos donde usan el nitrato de calcio, específicamente dentro de la subcuenca que aporta a Estero Lodana; y los mismos autores refieren que existe en la zona un uso indiscriminado de fertilizantes. Se puede entonces plantear que el uso de fertilizantes y la intervención antrópica constituyen elementos significativos en la degradación de la calidad del agua en la zona de estudio.

3.5. Análisis del comportamiento de los parámetros en el punto 14, entrada de la potabilizadora

La Figura 3.3 muestra la comparación de los niveles de dureza a la entrada de la planta, en relación con el límite máximo permisible de la norma ecuatoriana (Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN), 2011), que es de 300 mg/L, por lo que en todos los casos se requeriría realizar tratamiento para reducir la misma, específicamente la permanente.

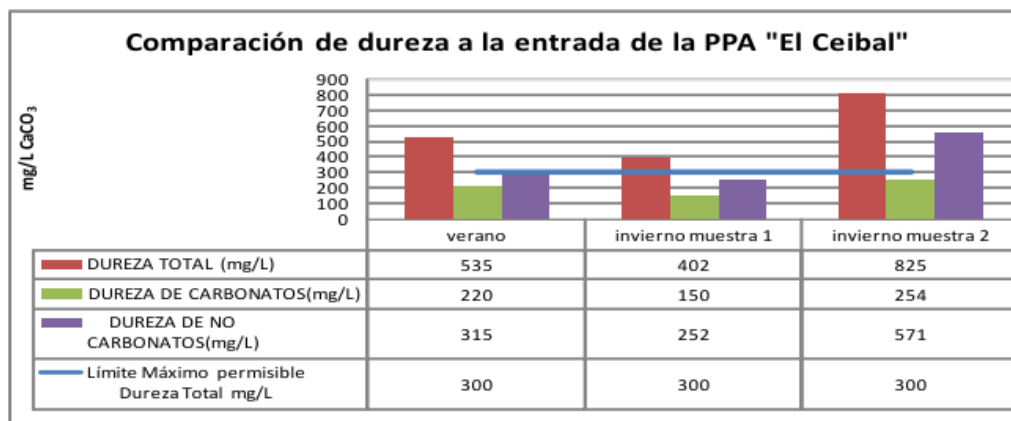


Figure 3.3. Comparación de la dureza a la entrada de la planta en tres momentos del estudio con la norma.

En el estudio no se cuenta con las características del agua tratada, ya que es una información con acceso limitado, por lo tanto fue necesario realizar encuestas a la población abastecida, para conocer a través de la percepción de los usuarios la existencia de la problemática una vez que el agua ha sido tratada.

3.6. Aportaciones de la encuesta

La encuesta resultó un instrumento de trabajo para enfocar el problema de la dureza del agua de consumo humano. Mediante doce preguntas se enfocó a cuatro aspectos fundamentales: caracterización del consumo de agua; origen y tiempo de consumo; percepción del efecto de la dureza del agua en actividades domésticas; y afectaciones a la salud por enfermedades vinculadas a la dureza del agua.

La Figura 3.4 muestra el tiempo de permanencia en el lugar de los habitantes encuestados, donde la mayor

parte de la muestra (56,1 %) lleva más de 15 años viviendo en el lugar. Solo el 10 % de los encuestados viven recientemente (entre dos y cinco años) en las localidades seleccionadas.

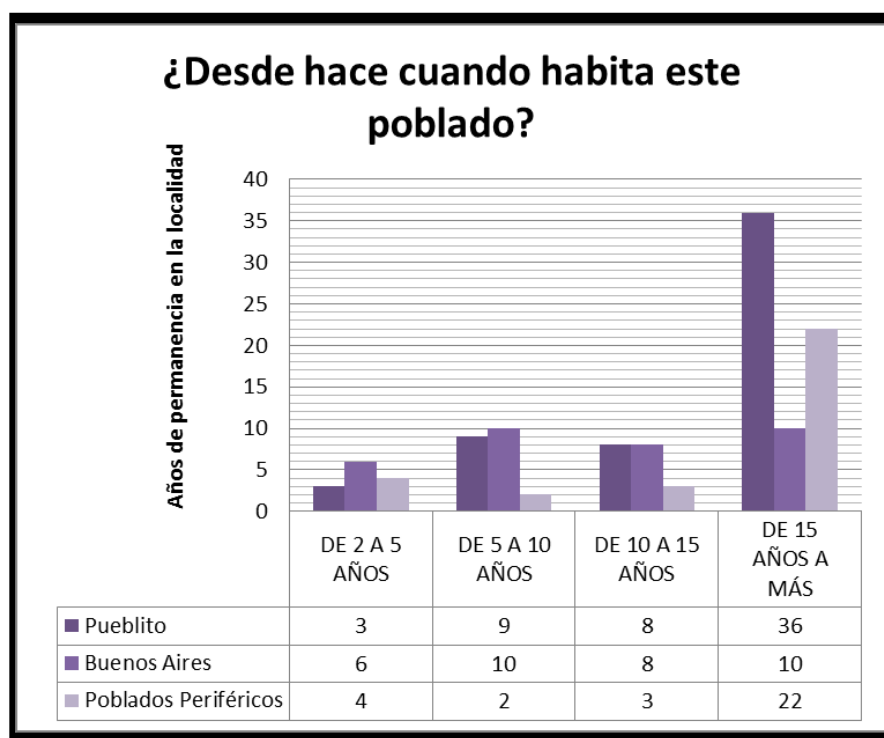


Figure 3.4. Tiempo que habita la población encuestada en la zona de estudio.

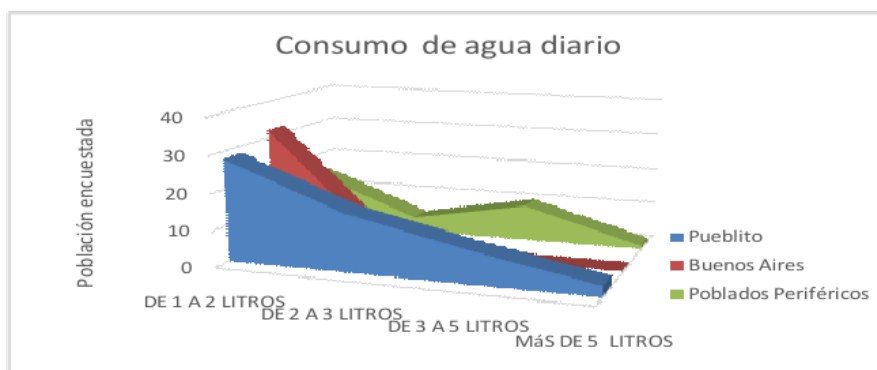


Figure 3.5. Consumo de agua diario según referencia de encuestados.

En la Figura 3.6, 104 pobladores (86 % de la muestra) son abastecidos desde la PPA “El Ceibal”; solo el 14 % de los encuestados consumen agua cruda, directo del río o por pozo. De ahí que se continúe el análisis solo con los 104 encuestados abastecidos desde la potabilizadora.

Las preguntas 6, 7, 8 y 9 están enfocadas a conocer qué daños perciben los consumidores en las actividades domésticas asociados a la dureza del agua (Figura 3.7 y Figura 3.8).

3.7. Valoración del agua según Índice de Langelier

Para corroborar las afectaciones a la calidad de agua por incrustaciones, se emplea el cálculo del Índice de Langelier (IL), definido como:

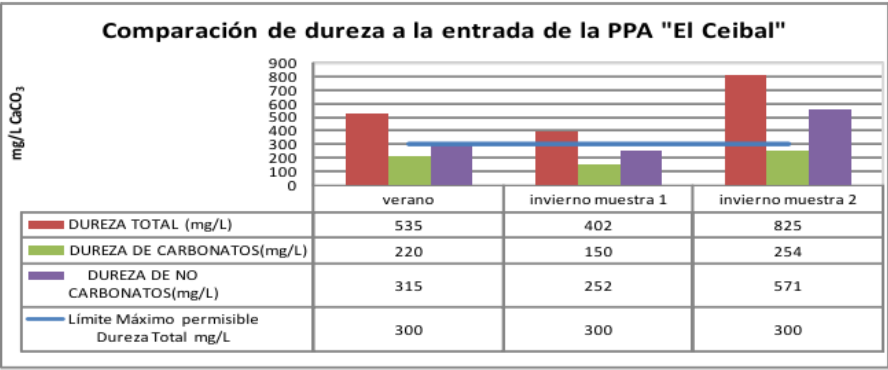


Figure 3.6. Procedencia del agua de consumo.

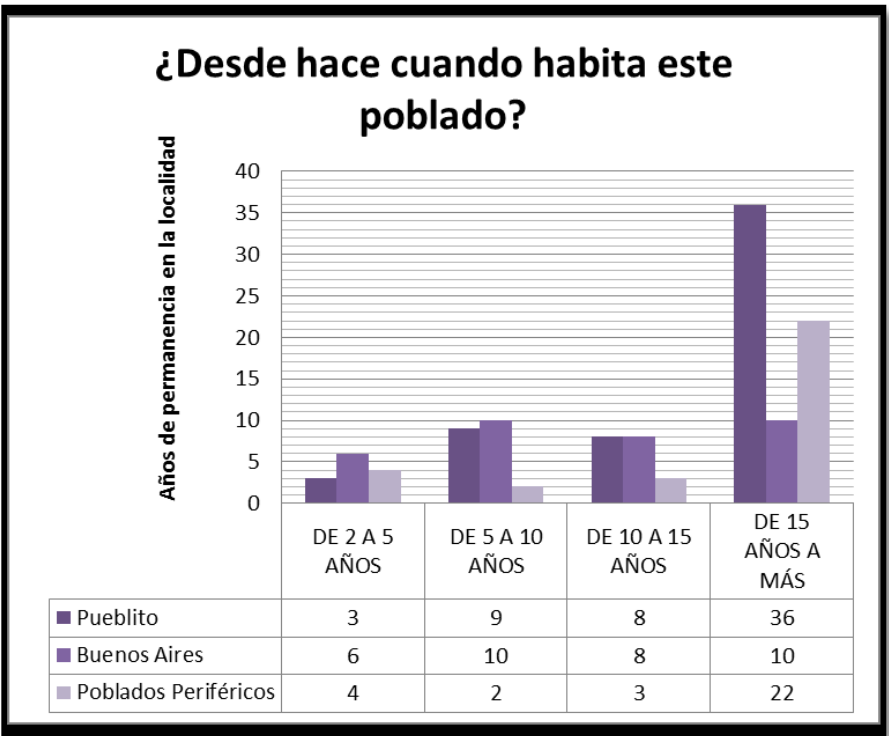


Figure 3.7. Percepción de daños en actividades domésticas por los encuestados.

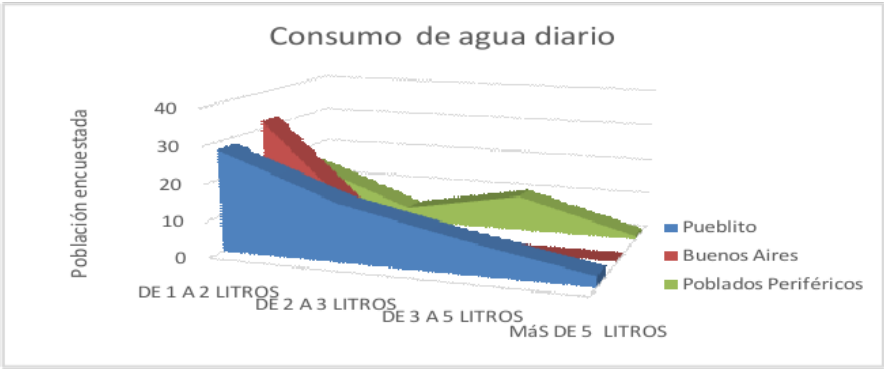


Figure 3.8. Productos de higiene doméstica.

$$IL = pH - pH_s = pH - (TF + AF - 12,5) \quad (3.1)$$

Donde: pH es el pH medido del agua; pH_s es el pH de saturación; TF es el factor asociado a la temperatura y la dureza total; y AF es el factor de alcalinidad. Se obtiene, como se muestra en la Tabla 3.3, que realmente se trata de un agua incrustante, causante de la problemática identificada por los pobladores de la muestra.

Table 3.3. Índice de Langelier a la entrada de la PPA “El Ceibal”.

Parámetro	Verano	Invierno
pH	8	8,1
Temperatura (°C)	30,3	28
TF	0,7	0,7
Dureza total	2050	1954
Alcalinidad	350	347
AF	2,6	2,6
IL	1,8	1,9

IL mayor que 1,5 = Agua Incrustante.

3.8. Afectaciones a la salud por enfermedades vinculadas a la dureza del agua

Las preguntas 10, 11 y 12 (Figura 3.9) están enfocadas a conocer los efectos que sobre la salud de los habitantes de esta comunidad tiene el consumo de agua dura, lo cual se investiga hacia tres aspectos fundamentales: sintomatología asociada a daños en vías urinarias y riñones; afectaciones renales; y afectaciones a la piel.

La Figura 3.9 muestra que el 36 % de la muestra refiere sintomatología que puede estar relacionada con patologías que se potencian ante la presencia de agua dura y el 8 % de enfermos confirmados, lo cual tiene la misma tendencia de los resultados del estudio de Melitón (2008), quien refiere que poblaciones con concentraciones mayores de 300 mg/L de CaCO_3 presentan entre el 8 % y el 27 % de enfermos de litiasis. Igualmente el estudio de Neira (2006) plantea una buena correlación entre el incremento de la dureza del agua y la urolitiasis. La encuesta arroja que existe una incidencia importante de afecciones de la piel, para un 28 % de la muestra, lo cual debe ser estudiado, ya que no hay referencias de otros estudios que vinculen con certeza la dureza del agua con presencia de afectaciones en la piel (Arnedo-Pena et al., 2003).

3.9. Diagnóstico y propuesta de actuación en la zona de estudio

De acuerdo con los resultados obtenidos, tanto de los análisis de laboratorio como de las encuestas, se llega al diagnóstico siguiente: las mayores aportaciones a la dureza total en el río provienen de la subcuenca Santa Ana, que tiene 210 km², con valores medidos tan altos como 2050 mg/L; a la PPA “El Ceibal” llega el agua con elevadas concentraciones de dureza total que sobrepasan los 500 mg/L; y existen afectaciones tangibles a la calidad de vida de la población servida.

En ese sentido se proponen acciones orientadas a: la implementación de medidas de protección hacia las acciones antropogénicas específicamente en la subcuenca Santa Ana; la implementación de medidas de monitoreo desde la salida del embalse Poza Honda hasta la entrada a la PPA “El Ceibal”; y analizar la posibilidad de adaptación tecnológica de la PPA “El Ceibal” para reducir la dureza a la salida.

Respecto a la adaptación tecnológica, se valoraron dos variantes: una conductora desde la salida de la presa Poza Honda hasta la PPA “El Ceibal” (con más de 60 km de longitud y diámetros entre 1000 y 1200 mm, de alta complejidad y costo); y la inserción de una línea de ablandamiento en la PPA (con un volumen de agua a tratar de alrededor de 3750 m³/h). Un estudio realizado por la consultora ADISOL S.A. (2014) refiere que el tratamiento de niveles de dureza total del orden de 983,78 mg/L tiene un costo de operación de más de 40 mil dólares diarios, mientras que niveles mínimos de dureza del orden de 375,16 mg/L tendrían un costo de operación de 14 mil dólares diarios.

De forma general, los autores consideran que las intervenciones constructivas en la PPA “El Ceibal” no son

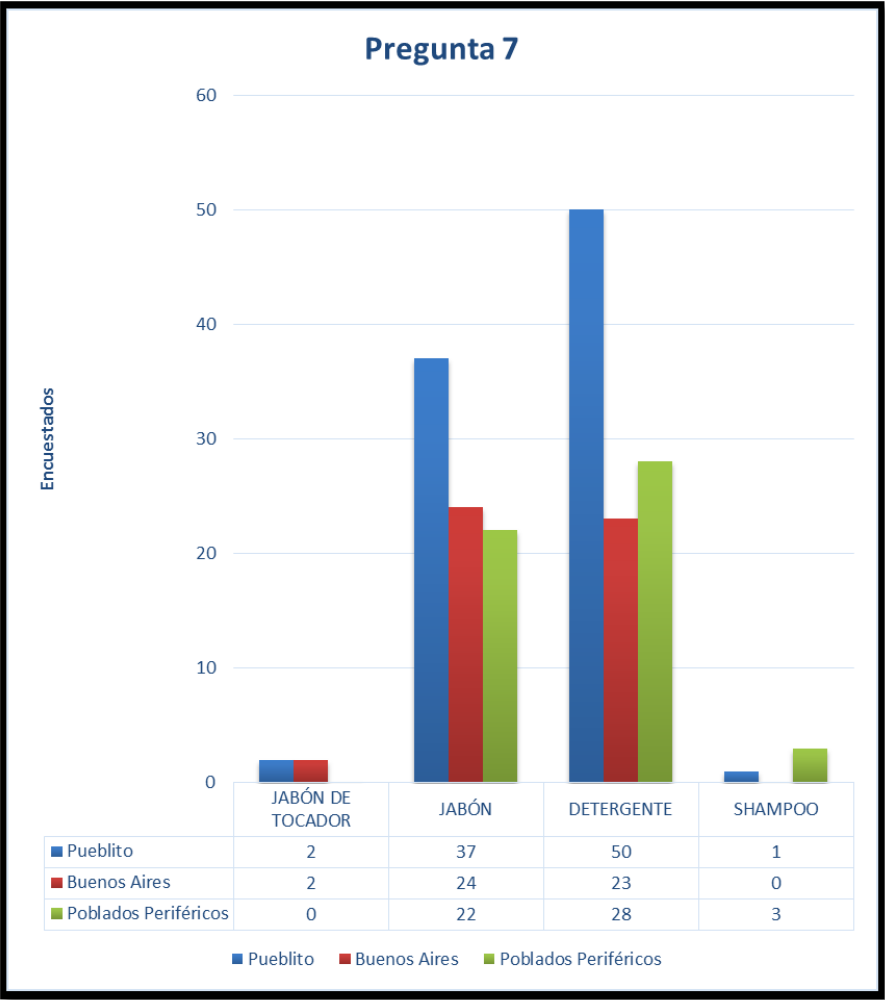


Figure 3.9. Afectaciones a la salud en la muestra estudiada.

necesarias si se implementan adecuadamente las medidas de mitigación y control de la contaminación en la zona de estudio. De acuerdo con el diagnóstico realizado, la propuesta de mitigación tendría un costo bimensual como el que se muestra en la Tabla 3.4, para un total anual estimado de 128 mil 400 dólares, lo que resulta menor que el costo de operación de los procesos de ablandamiento.

Table 3.4. Costo del programa de reducción de la contaminación.

Medidas de mitigación	Actividad	UM	Costo unitario	Muestras bimensual	Costo total
Sistema de monitoreo y control de Portoviejo	Análisis completo físico-químico en los 10 puntos de muestreo	USD	200	10	2000
	Inspección	USD	800	5	4000
	Evaluación/actualización	USD	2000	1	2000
Medidas de protección y control Santa Ana	Análisis completo físico-químico en 5 puntos de muestreo subcuenca Santa Ana	USD	200	5	1000
	Inspección de zona a muestras críticas	USD	800	3	2400
	Educación comunitaria	USD	800	10	8000
	Evaluación/actualización	USD	2000	1	2000
Total programa de mitigación (USD)					21 400

El éxito de este programa depende del trabajo multidisciplinario e interdisciplinario de las autoridades implicadas y el apoyo del gobierno provincial de Manabí.

04 CONCLUSIONES

Se realizó el estudio de la calidad del agua, atendiendo específicamente al comportamiento del parámetro dureza total, temporal y permanente desde la salida de la represa Poza Honda hasta la entrada de la PPA “El Ceibal”, concluyendo que:

- Los puntos ubicados aguas arriba de Estero Lodana no presentan problemas relacionados con la dureza, entre los que se incluye el embalse Poza Honda.
- El punto que mayor aportación de dureza total presenta es Estero Lodana, que recibe las aguas de la subcuenca Santa Ana, con indicadores de contaminación local por causas antropogénicas vinculadas a los sistemas de riego existentes.
- Los indicadores que se incrementan con respecto a las características naturales del río Portoviejo son dureza temporal, permanente, conductividad, sólidos disueltos totales y sulfatos.
- La dureza total de Estero Lodana está caracterizada por altas concentraciones de dureza permanente, asociada fundamentalmente a afectaciones causadas por áreas de riego con un inadecuado manejo de fertilizantes como sulfato de calcio.
- La dureza a la entrada de la PPA “El Ceibal”, en todas las condiciones sobrepasa los 300 mg/L, comprobándose en el estudio concentraciones de 535 mg/L, parámetro para el que no hay tratamiento previsto.
- Se propone como alternativa de solución la implementación de un programa de reducción de la contaminación, centrado en un sistema de monitoreo y control de la calidad del agua en el cauce del río Portoviejo y medidas de protección y control de la subcuenca Santa Ana. El costo de implementación del programa propuesto está valorado en 128 mil 400 dólares anuales.

05 AGRADECIMIENTOS

La investigación que da origen a los resultados presentados en esta contribución recibió reconocimientos de los pobladores que utilizan el agua de la planta “El Ceibal”.

06 REFERENCIAS

- ADISOL S.A.** (2014). *Estudio de costos de operación para tratamiento de ablandamiento. ppa el ceibal* (tech. rep.). ADISOL S.A. Manabí, Ecuador.
- Arnedo-Pena** et al. (2003). Dureza del agua y afecciones de la piel.
- Cevallos, C.** (2009). Caracterización de la cuenca del río portoviejo.
- Curia & Suárez.** (2011). Uso de fertilizantes en polígonos experimentales de la subcuenca santa ana.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN).** (2011). *Norma técnica ecuatoriana nte inen 1108. agua potable. requisitos* (tech. rep.). INEN. Quito, Ecuador.
- Matato** et al. (2009). Análisis químicos de aguas en manabí.
- Melitón, W.** (2008). Relación entre la dureza del agua y la litiasis en poblaciones expuestas.
- Neira, M. A.** (2006). Correlación entre el incremento de la dureza del agua y la urolitiasis.
- Organización Mundial de la Salud.** (2004). *Guías para la calidad del agua potable* (3rd ed., Vol. 1). http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3sp.pdf
- Seoáñez, M.** (1995). Expansión urbana [Citado en Scornik et al. (2006)]. In *Pasos hacia una gestión urbana del desarrollo sustentable*. Universidad Nacional del Nordeste.

Conflicto de intereses

No hay conflicto de intereses.

ORCID de los autores

Juan Gabriel Chipantiza Masabanda	https://orcid.org/0000-0002-7005-9134
Evelin Laura Zambrano	https://orcid.org/0009-0004-3919-9720
Teresita de Jesús Romero	https://orcid.org/0000-0001-7857-0140
Odalys Méndez Valdés	https://orcid.org/0000-0002-7519-9638

Tratamiento magnético en la potabilización y el tratamiento de aguas residuales. Parte I

Nuria de los Ángeles Vaillant LópezE-MAIL: nuryvaillant@gmail.com

Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), Calle 114 #11901 e/ Ciclovía y Rotonda. Marianao, La Habana, Cuba.

Guillermo Ribeaux KindelánE-MAIL: ribeaux@uo.edu.cu

Centro de Electromagnetismo Aplicado (CNEA), Universidad de Oriente. Santiago de Cuba, Cuba.

RESUMEN

En la actualidad, es imprescindible incorporar métodos y tecnologías más limpias y eficientes en la mejora del conjunto de técnicas para la potabilización y el tratamiento de aguas residuales. En el presente trabajo se indaga acerca de las investigaciones y beneficios del tratamiento magnético en estos procesos, revelándose como una tecnología innovadora, limpia, de rápida amortización, sin consumo adicional de energía, y de fácil y sencilla aplicación, por lo que ha sido reconocida a nivel mundial desde inicios del siglo XX. En este primer trabajo de dos partes, la principal conclusión de la revisión de la literatura es que la aplicación de campos magnéticos tiene la facultad de influir directamente en los procesos de coagulación, y en la eliminación de incrustaciones.

PALABRAS CLAVE: *coagulación, desincrustante, tratamiento magnético*

Magnetic technology in potabilization and wastewater treatment

ABSTRACT

At the present time, it is essential to incorporate cleaner and more efficient methods and technologies to improve the techniques used for water purification and wastewater treatment. This study examines research into and the benefits of magnetic treatment in these processes, revealing it to be an innovative, clean technology that offers a quick return on investment, requires no additional energy, and is simple to apply—qualities for which it has been recognized worldwide since the early 20th century. In this first of two papers, the main conclusion drawn from the literature review is that the application of magnetic fields can directly influence coagulation processes and the elimination of scale deposits.

KEYWORDS: *coagulation, scale remover, magnetic treatment*

01 INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, se ha venido estudiando el uso del tratamiento magnético (TM) para el tratamiento de agua para consumo humano e industrial, y en el tratamiento de aguas residuales. El tema ha recibido mucha atención de la comunidad científica por la implicación que tiene en lo económico y en el cuidado del medio ambiente, conociendo que los tratamientos convencionales poseen los inconvenientes del uso de químicos y aguas de desecho contaminantes, la producción de malos olores producto de la materia en remoción en el caso de tratamiento de aguas residuales, el costo de los reactivos, constante supervisión y mantenimiento, altos niveles de pretratamiento y altos costos de inversión inicial y de operación, en algunos casos; por lo que adquiere mayor importancia el uso de tecnologías limpias como el TM, de fácil aplicación, rápida amortización, sin consumo adicional de energía y resultados comprobados.

De forma general, no existen dudas de la efectividad del TM, pero sí coexisten discrepancias en la explicación

del fenómeno que se observa, existiendo incógnitas en la explicación teórica de la influencia del campo magnético (CM) sobre las propiedades de los sistemas acuosos. Muchos artículos describen diferentes tipos de mecanismos de acción del campo magnético y varios de ellos incluso están en conflicto entre sí. Este asunto se complejiza si se tiene en cuenta la influencia de parámetros externos como la temperatura, el material de las tuberías y el amplio rango de frecuencias, intensidad, tiempo de exposición y velocidad del fluido, entre otros (Vaillant López et al., 2022).

El Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado (CNEA) líder del desarrollo de esta tecnología, la ha aplicado en sistemas ingenieros industriales desde 1992, en el sector agrícola desde el 2000 y en el pecuario-avícola desde el 2009, con ejemplos bien documentados que muestran que es un método eficiente para prevenir y reducir las incrustaciones, el tratamiento de combustibles, mejorando el intercambio de calor, ahorrando energía y recursos (Arias Gilart et al., 2018; Campos et al., 2015; CNEA, 2011; Espinoza, 2019; Gálvez Vidaurre, 2010; Ribeaux Kindelán & Mesa Pérez, 2001).

02 MATERIALES Y MÉTODOS

Para la búsqueda y localización de la información se utilizaron palabras claves, se enfatizó en investigaciones de los últimos diez años y los idiomas español, inglés y ruso, aunque se realizó búsqueda automatizada en bases de datos online, revistas que publican artículos sobre el tema en cuestión, y de otras fuentes bibliográficas impresas, sin restricción de fechas e idiomas. Se identificaron los autores más destacados en el tema, mediante el Science Citation Index, referencias de estudios personales y artículos de revisión.

Los procedimientos y metodologías utilizados por los investigadores referenciados para obtener las muestras y resultados, son de naturaleza variada, por lo que se especifica en cada caso sus aspectos esenciales. Con el objetivo de concretar las teorías y resultados investigativos expuestas en este trabajo, se han ordenado por tipo de aplicaciones y año de publicación. Además, se respetan literalmente las ideas y conclusiones de sus autores, y no es objetivo de este trabajo analizarlas críticamente, sino exponer la diversidad y alcance de las mismas. El tratamiento analizado en la presente revisión incluye el campo eléctrico (CE), el campo magnético (CM) y los campos electromagnéticos (CEM).

En este trabajo (**parte I**), se indaga acerca de las investigaciones y posibles beneficios del TM en la potabilización y el tratamiento de aguas residuales, explorando específicamente su contribución en los procesos de coagulación floculación, y sus efectos en la cristalización del Carbonato de Calcio, y otras sales disueltas en agua.

03 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Tratamiento Magnético

La observación del efecto de los CM en el TM del agua es conocida desde el siglo XIX, no obstante, la actualización de esta técnica se acredita en 1945, al ingeniero belga Theo I. S. Vermeiren que utilizó el fenómeno descubierto por Michael Faraday para el tratamiento del agua industrial. En 1957 también propuso la primera aplicación práctica para el control de incrustaciones (Vermeiren, 1958).

Los acondicionadores magnéticos se ubican en los sistemas de manera que el fluido circule a través del CM, en el que interactúan las líneas de inducción magnética directamente con el fluido, según muestra la figura 3.1. Para garantizar un tratamiento eficiente deben cumplirse varios requerimientos, de los cuales los más importantes son: lograr la perpendicularidad de líneas de inducción magnética $\vec{B}$ con respecto al movimiento del fluido. El segundo requerimiento está relacionado con el tiempo de exposición del fluido al CM (Ribeaux Kindelán, 2011). Actualmente se comercializan varios tipos de imanes permanentes y dispositivos magnéticos (DM), que se encuentran en el mercado con costos relativamente altos. Estos presentan diferentes configuraciones e intensidades de CM, y están diseñados para distintos diámetros de tubería, pero su uso ha causado muchas controversias debido al poco entendimiento que se tiene sobre los mecanismos y parámetros de diseño de los dispositivos magnéticos por parte de los proveedores. Para la fabricación de imanes se utilizan los siguientes materiales: aleaciones de Neodimio, Hierro y Boro (NdFeB); aleaciones de Samario y Cobalto (SmCo); aleaciones Alnico y

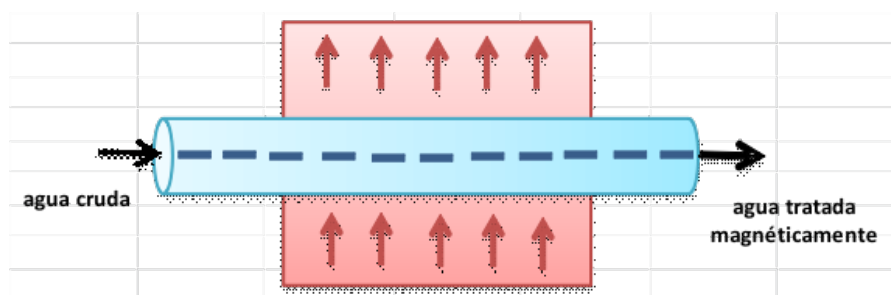


Figure 3.1. Tratamiento magnético del agua.

Ferritas Cerámicas.

Los diferentes enfoques para la aplicación del tratamiento magnético tienen efectos significativamente diferentes en el rendimiento de cada sistema. El uso de imanes permanentes normalmente crea un CM uniforme. Sin embargo, el campo se puede variar cambiando la orientación y disposición de los imanes. Diferentes formas (y geometría) de imanes permanentes también pueden exhibir diferentes valores de intensidad de CM.

Los dispositivos de campos electromagnéticos pueden colocarse en el agua tratada antes de que entre en los sistemas de agua, o en la superficie propensa a la formación de incrustaciones, lo que se denomina pretratamiento y cotratamiento, respectivamente.

3.2. Efectos del campo magnético sobre la cristalización del carbonato de calcio disuelto en agua

Las incrustaciones más comunes en los sistemas de agua son compuestos de CaCO_3 , CaSO_4 , SrSO_4 , BaSO_4 , CaF_2 , $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, sílice y silicatos. La formación de incrustaciones se produce cuando la concentración de una sal poco soluble supera su solubilidad en agua. Generalmente, resulta de cambios en el pH, la temperatura, la desgasificación o la presión, que afectan la solubilidad de las sales, y de un proceso de concentración o evaporación. Por ejemplo, cuando la temperatura del agua aumenta, la solubilidad del CaCO_3 disminuye, lo que provoca su precipitación sobre superficies calentadas (Alabi et al., 2015).

La formación de incrustaciones depende principalmente de la química del agua de alimentación. Los tipos comunes de incrustaciones se pueden clasificar en alcalinas (p. ej., CaCO_3), no alcalinas (p. ej., CaSO_4) y a base de sílice (Antony et al., 2011). El CaCO_3 es el componente más común de las incrustaciones, proveniente de los iones de calcio y bicarbonato presentes en aguas superficiales, subterráneas, salmueras y aguas industriales (Piyadasa et al., 2018). Otras sales que forman incrustaciones incluyen una variedad de compuestos con baja solubilidad en agua, como MgCO_3 , BaSO_4 , $\text{Fe}_2(\text{CO}_3)_3$, óxidos de hierro, silicatos, fluoruros y fosfatos.

La presencia de sales de magnesio y calcio en el agua depende fundamentalmente de las formaciones geológicas atravesadas por el agua de forma previa a su captación. Por lo general, el agua subterránea es más dura que el agua de superficie. El agua subterránea, rica en ácido carbónico y oxígeno disuelto, suele poseer un alto potencial solubilizante, lo que va a provocar un mayor grado de erosión del suelo o de las rocas, las cuales contienen cantidades apreciables de minerales como la calcita (CaCO_3), yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$) y dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) lo que, en consecuencia, puede llegar a elevar los niveles de dureza en varios miligramos por litro. Las aguas subterráneas procedentes de acuíferos con composición eminentemente silicatada como basalto, arenisca y granitos, dan lugar a un agua blanda, es decir, con cantidades muy bajas de sales de calcio y magnesio. El CaCO_3 , uno de los principales compuestos que produce incrustaciones, posee tres variedades morfológicas: calcita (más abundante y estable), aragonita, y vaterita (raramente encontrada). La calcita es un tipo de cristal que al precipitar se adhiere a las superficies de transferencia de calor como incrustación de difícil remoción, pero la aragonita precipita como partículas suspendidas en el agua y se adhiere poco sobre dichas superficies, formando granos de menor tamaño o depósitos de una incrustación suave, estable con la temperatura. Nótese en la figura 3.2 la diferencia en la morfología de sus cristales.

La cristalización a partir de soluciones es un proceso complejo que se caracteriza por las etapas de formación de



Figure 3.2. Cristales de (A) calcita, (B) aragonita y (C) vaterita (Bolívar, 2019).

supersaturación, nucleación y crecimiento cristalino, así como de fenómenos secundarios, tales como agregación, aglomeración, quebramiento, redisolución y maduración (Ribeaux Kindelán, 2011).

Si un CM puede afectar la formación y el desarrollo de una capa incrustante, sería resultado de una modificación en el comportamiento de la cristalización de la sustancia formadora de la capa. Tales modificaciones podrían ser conseguidas, por ejemplo, por la influencia sobre la velocidad de nucleación o de crecimiento de los cristales o por una alteración en una propiedad física del sistema (solubilidad de equilibrio, viscosidad, pH, tensión superficial), lo que a su vez influenciaría el curso de la cristalización.

Está bien establecido por todos los estudios revisados, que al pasar un CM, producido en general por imanes permanentes, a través de un fluido a determinada velocidad y distribución espacial, el efecto fundamental observado en el caso del agua, es la reducción de las incrustaciones de sales, e incluso, la disolución de las mismas. Además, se observa la aceleración de la formación de cristales del tipo aragonita en la misma medida en que se intensifica la inducción del CM al que se somete el agua; y en ausencia del mismo, los cristales formados son fundamentalmente del tipo calcita.

En la figura 3.3 se muestran cristales de CaCO_3 con TM y sin TM. Se utilizó difracción de rayos x y se observan claramente la casi ausencia de cristales de aragonita al ser aplicado el TM. Es importante resaltar, que el TM no es una tecnología para remover dureza del agua, sino que influye directamente sobre la formación de los cristales, principalmente del carbonato de calcio (CaCO_3).

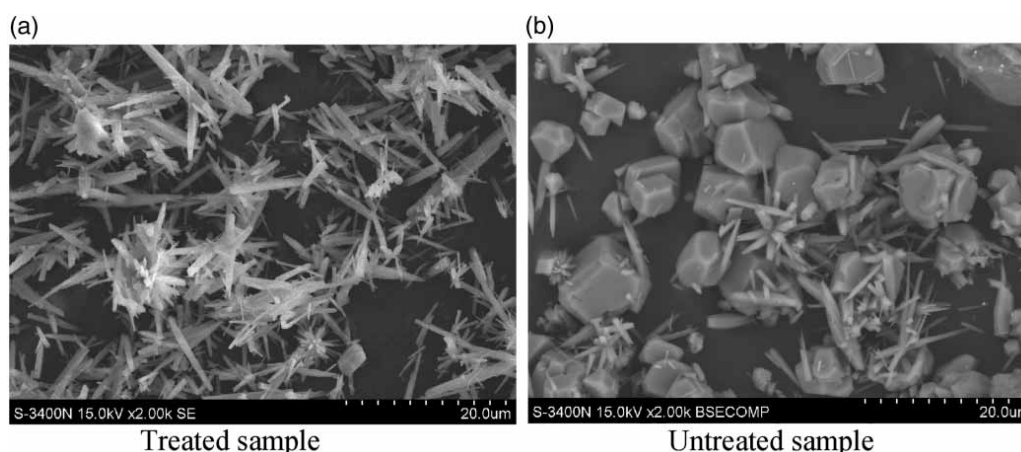


Figure 3.3. Cristales obtenidos: (a) con TM y (b) sin TM (Zhao et al., 2014).

El TM tiene un prolongado y controvertido trayecto en lo que respecta a su validez contra la formación de incrustaciones en los sistemas de tratamiento de agua, a pesar de haberse demostrado su eficacia en numerosas aplicaciones industriales. Miles de estudios han descrito la acción antiincrustante asociada a los CM y el número de publicaciones ha aumentado exponencialmente con los años, lo que corrobora, a pesar de algunos detractores, que los CM constituyen una tecnología eficiente para el control de las incrustaciones.

De acuerdo con los resultados de Higashitani et al. (1992), en la misma medida en que se intensificaba la inducción del CM a la que se sometían las sustancias reaccionantes (CaCl_2 y Na_2CO_3 a 30°C), se aceleraba la formación de cristales del tipo aragonita; y en ausencia del CM, los cristales formados eran del tipo calcita. La precipitación del CaCO_3 estuvo marcada por una velocidad de nucleación más lenta y un cristal de más rápido crecimiento.

En investigaciones relacionadas, Wang et al. (1997) indagaron en la cristalización del CaCO_3 , a partir de CaCl_2 y Na_2CO_3 a 30°C , bajo la influencia del CM, y observaron que los cristales formados, después de agitar las sustancias reaccionantes por 1 min., tenían formas rómbicas y esféricas. Los primeros son calcita y los últimos podrían ser vaterita. El tamaño del grano fue de 5 a 10 μm . Pero, en presencia del CM, la mayoría de los cristales tenían formas irregulares (aragonita) y su diámetro (1 μm) era muy pequeño para identificar su estructura por microscopía óptica. Ellos asocian que este pequeño tamaño de partícula se deba a la rápida nucleación y precipitación de los cristales.

Kobe y colaboradores, ya desde el año 2001 observaron que bajo la influencia de un CM superior a 500 mT (miliTesla), la nucleación y el posterior crecimiento de aragonita podrían utilizarse con éxito como una forma de prevenir las incrustaciones. En el 2003, demostraron que, al cambiar la intensidad del campo, la relación calcita / aragonita / vaterita varió. En el 2008 explicaron que la presencia de un CM en la interfase líquido/sólido favorecía la transformación de los cristales de calcita a aragonita debido a la diferencia entre los estados electrónicos de las dos formas cristalinas. Los cálculos del estado electrónico de calcita y de aragonita dieron como resultado que se necesitaron 28 electronvoltio (eV) para pasar del estado electrónico de la calcita a la aragonita, esta energía la puede proporcionar un CM de 45 T (Tesla), para desplazar una distancia de 0.5 nm entre los iones de calcio y carbonato. Por tanto, la energía cinética que se requirió para hacer la transformación la suministró el CM externo y el flujo turbulento. Todo lo anterior lo describieron cuantitativamente a través de las ecuaciones de Navier-Stokes y Maxwell (Cefalas et al., 2008; Kobe et al., 2001, 2003).

También en el 2001 Gabrielli y sus colaboradores, estudian el problema desde una aproximación electroquímica, midiendo con un electrodo selectivo de Ca^{2+} , la cantidad de calcio iónico después del TM y la deposición electroquímica del CaCO_3 en un electrodo, mediante una sensible balanza de cuarzo, dando la cantidad de CaCO_3 depositado en función del tiempo. La idea es que, si el TM promueve la cristalización del CaCO_3 disuelto, la cantidad de calcio iónico debe disminuir después de realizado este y la capacidad de esta agua, que ha perdido calcio iónico, para depositar CaCO_3 en la interfase agua metal, debe disminuir. Los autores también encuentran mayor efecto en la disminución del calcio iónico cuando hay mayor gradiente de campo (Gabrielli et al., 2001).

En las investigaciones de Szkatula et al. (2002) se han reportado observaciones contradictorias sobre el efecto del CM hacia la cristalización. Para aguas duras que contienen sílice, demuestran que la aplicación magnética causa menos efecto en la cristalización. La masa total del depósito del agua tratada que contenía sílice era aproximadamente 25 veces menor que en el agua no tratada.

El estudio de Lipus and Dobersek (2007) sobre el tratamiento con CEM en superficies de intercambio de calor concluyó que las partículas finas en suspensión formadas en la solución a granel eran arrastradas por el flujo de agua. También se informó de que el CEM alteraba la precipitación del CaCO_3 , pasando de formar incrustaciones nucleadas en la superficie a cristalización mediante el aumento de la cantidad total de precipitado y favoreciendo su formación en la solución principal en lugar de su incrustación en las paredes.

Otros autores también han observado las contraacciones de los cationes de sílice y carbonato bajo la cristalización inhibidora de la exposición al CM (Coey & Cass, 2000; Higashitani et al., 1992). En el caso de Shahwan et al. (2010) se reportó que la masa total del depósito del agua tratada que contenía sílice era aproximadamente 25 veces menor que en el agua no tratada.

E. Chibowski en el 2003 establece también que el TM influye en el tamaño y la morfología de los cristales de carbonato de calcio que se forman, con una tendencia a favorecer la cristalización de la aragonita en lugar de la calcita, aunque él agrega que depende también del sustrato y de la composición del agua. En el 2018 agrega que el gradiente del CM es más importante para los efectos obtenidos, que la fuerza del campo en sí (Chibowski & Szczeń, 2018; Chibowski et al., 2003).

Alimi y colaboradores entre el 2007 y el 2009 encontraron que el TM genera una pre-precipitación del CaCO_3 y carbonato de magnesio (MgCO_3) en forma de partículas finas que se encuentran en suspensión y que depende del pH, caudal de agua y tiempo de residencia (Alimi et al., 2007, 2009).

Coey y Cass, quienes desde el 2000 y hasta la actualidad vienen haciendo aportaciones en este tema, reportaron un aumento de la proporción de cristales de tipo aragonita respecto a los de calcita (A/C). El experimento se realizó con un CM de 0.1T, velocidad del flujo entre 0.04 y 1.2 m/s. La mayor relación A/C se observó cerca de las 40 h después del tratamiento magnético y se mantuvo por cerca de 200 horas (memoria magnética), por lo que agregó que el CM no solo influye en la estructura y morfología del CaCO_3 sino también que el agua podría adquirir una impresión magnética de larga duración.

Aunque reconoce que los efectos de la memoria en el agua tuvieron una historia infeliz, su artículo se basó en la evidencia de un mecanismo de nucleación no clásico para el CaCO_3 y se pone en duda la teoría clásica de nucleación, sugiriendo una teoría en la que las soluciones de CaCO_3 (no saturadas) contienen racimos o grupos pre-nucleados termodinámica-estables llamados DOLLOPs (Dynamically-Ordered Liquid-Like Oxyanion Polymers), que serían los que, cuando están sujetas a un CM alteran su composición y se deforman, favoreciendo un cierto tipo de estructura de racimo, que son los que permiten tener una gran memoria magnética en la solución (Coey, 2012; Coey & Cass, 2000).

Para Zhaohui Xi y sus colaboradores, cuando el agua fue tratada por una alta potencia y alta frecuencia electromagnética, el tamaño y la forma de los cristales de CaCO_3 cambiaron significativamente, y el efecto desincrustante fue característico (Xi et al., 2010).

Resulta interesante lo observado en algunos estudios, donde la eficiencia de la inhibición de incrustaciones aumenta con el tiempo de tratamiento electromagnético, pero no se muestran cambios significativos tras un cierto tiempo de exposición, que en el caso de Ge et al. (2010) fue de 60 minutos. Se ha observado que los efectos de la aplicación electromagnética en la formación de incrustaciones dependen exponencialmente de la dureza del agua. Otros parámetros podrían verse afectados de forma conjunta con la aplicación del CM, como la disminución del pH y el aumento de la concentración de oxígeno disuelto.

En los resultados obtenidos del trabajo de investigación de Vaca Jiménez, en 2014 parece comprobarse la teoría de cambio estructural de las sales disueltas y lo correspondiente a la memoria magnética debido a la presencia de los DOLLOPs, ya que la disminución de incrustaciones en la caldera no correspondió a un cambio de régimen de flujo en el equipo (Vaca Jiménez, 2014).

Hon Siau Shi investigó varios parámetros como pH, turbidez y sólidos suspendidos totales (SST), en agua sin TM y agua con 3 densidades de flujo magnético y velocidades de flujo diferentes, donde obtuvo que el CM redujo la turbidez y los SST de la muestra de agua alrededor del 50 % y 20 % respectivamente. En la salida de la muestra de agua del sistema con CM, la concentración de Ca^{2+} y Mg^{2+} fue 90 % y 20 % más alta que el sistema sin CM. Además, con la mayor velocidad de flujo (1.5 ml/s), los dispositivos magnéticos invertidos, en la salida de muestra de agua se obtuvieron concentraciones 40 % mayores que con los magnetizadores no invertidos. También, para mayor densidad de flujo magnético (0,4 T) se eliminó 40 % más de calcio y magnesio. Concluyendo, la presencia de TM mejoró la eliminación de incrustaciones y redujo la turbidez y SST, a mayor densidad de flujo magnético y mayores caudales (Shi, 2014).

Cuando Zhao et al. (2014) investigaron los CM en la precipitación de CaCO_3 , tanto teóricamente como experimentalmente, los resultados indicaron que el ajuste de la velocidad del flujo de agua, la electrostática de alto voltaje y los CEM pulsados, de frecuencia variable, como efecto combinado, favorecen la aparición y el crecimiento de aragonita y restringe la transición a la calcita, aunque el mecanismo para la reducción de escamas se discute.

En los estudios de Mahmoud et al. (2016), los parámetros químicos del agua tratada electromagnéticamente tenían prácticamente los mismos valores que el agua de referencia, por lo que el tratamiento solo afecta a la morfología cristalina del CaCO_3 , y no consigue ningún efecto en las características químicas del agua tratada. En el año 2016 se utilizó el equipo de electromagnetismo comercial Antical RF, y agua principalmente de la red, aunque también con agua sintética para poder experimentar con concentraciones conocidas. Se utilizó el test de Meigen para los análisis de formación de cristales de aragonita/calcita. Estos investigadores concluyen

que tras la aplicación del CM se produce mayor formación de cristales de aragonito y una disminución de los cristales de calcita. La reversibilidad del proceso fue estimada en 72 horas aproximadamente en las condiciones del experimento (Verdú, 2016).

Los hermanos Hafidi, estudiaron los efectos del TM de agua en las incrustaciones de CaCO_3 , y expusieron cómo los imanes permanentes ayudan a eliminar la costra existente en los depósitos en el agua. Demostraron que el aumento del CM influye fuertemente en la proporción de aragonita/calcita obtenida (Hafidi & Hafidi, 2017).

Las técnicas electromagnéticas han sido utilizadas desde hace tiempo en multitud de campos para diferentes tipos de tratamientos. En el ámbito del agua uno de sus principales usos es reducir los depósitos de cal, dado que estas técnicas tienen influencia en la formación cristalina de los precipitados de carbonato cálcico que producen incrustaciones, en forma de calcita en ausencia de tratamiento. Las técnicas electromagnéticas dan lugar a la cristalización como aragonito, cuya precipitación no produce incrustaciones en las conducciones de agua, e incluso es capaz de disolver precipitados de calcita previamente formados (Martínez Moya et al., 2019).

En las investigaciones de Vaillant López et al. (2022) se relaciona la dureza total (DT) con la posibilidad de la eliminación de incrustaciones, buscando una posible causa estructural, y se obtienen disminuciones significativas de la DT en las muestras sometidas al CM. Además, se puede observar disminución de la misma con el aumento de la intensidad del CM e independiente del tiempo de exposición.

Fathi Alimi realiza experimentaciones para determinar el efecto del CM en el agua de mar. Sus resultados muestran que la aplicación del TM al agua de mar estándar tuvo un efecto significativo en la cinética de deposición de cristales. Este TM aumentó el tiempo de nucleación del carbonato de calcio de 7.5 a 12 horas y el tiempo de escalado de 19 a 23 horas. A partir de la formación de dos capas superpuestas observadas, postula que existen diferentes formas de grupos de CaCO_3 en la solución sobresaturada después de la aplicación de un CM. Así, la calcita se depositó sobre la capa de aragonita porque los grupos favorables para la calcita no fueron adsorbidos por la superficie del cristal como los de la aragonita (Alimi, 2024).

Gao y colaboradores investigaron el efecto y el mecanismo del pretratamiento de magnetización sobre la inhibición de incrustaciones en el proceso de Ósmosis Inversa. Ellos muestran que el efecto de la inhibición de incrustaciones se vuelve más obvio con el aumento del flujo, porque cuando la velocidad del flujo es demasiado baja (menos de 0,24 m/s), casi no hay efecto de inhibición de incrustaciones. A esta velocidad, sólo se puede lograr una inhibición de incrustaciones muy débil cuando el tiempo de magnetización es de 10 a 20 minutos (Gao et al., 2024).

Entre los estudios revisados, solo Salman et al. (2015) no observó ningún efecto de los CEM sobre el agua potable y el agua de mar. Los resultados demostraron que los CEM afectaban claramente a la turbidez y al contenido total de sólidos en suspensión del agua analizada, pero no alteraban la composición química, la dureza, los compuestos orgánicos ni los oligoelementos, tanto en el agua potable como en el agua de mar en las pruebas a escala piloto. Sin embargo, lograron reducir la formación de incrustaciones de CaCO_3 , CaSO_4 y BaSO_4 en las pruebas a pequeña escala de laboratorio con soluciones sintéticas. En consecuencia, la eficacia de los CEM dependió de diferentes parámetros, como la composición química del agua, el caudal, los parámetros de funcionamiento y la potencia magnética.

3.3. Tratamiento magnético para optimizar los procesos de coagulación

Varios autores investigaron los efectos del CM sobre la estabilidad de las partículas coloidales y sugieren que el CM afecta la estabilidad coloidal al alterar la estructura de las moléculas de agua e iones adsorbidos en la superficie de la partícula o en el medio. En consecuencia, las partículas se alinearon perpendicularmente a la dirección del campo aplicado lo que dio como resultado una mejora de la coagulación.

La coagulación – floculación es uno de los tratamientos realizados en los procesos de potabilización y tratamiento de aguas residuales. Se utiliza para lograr la remoción de turbiedad orgánica e inorgánica, color verdadero y aparente, sustancias productoras de sabor, bacterias y organismos patógenos susceptibles de ser separados, y la destrucción de algas y plancton en general. Como la mayoría de los coloides están cargados negativamente, son estables debido a la repulsión electrostática las partículas. Esta repulsión sobrepasa las fuerzas de atracción de Van der Waals, por lo que no se aglomeran y, por lo tanto, no precipitan (Vaillant López et al., 2026).

Varios factores afectan el proceso: pH (por el rango de pH en que es más efectivo el coagulante), tiempo de contacto (el reactivo debe difundirse y neutralizar las cargas de todo el coloide antes de la formación de los flóculos), el gradiente de velocidad (debe estar en los rangos adecuados según etapa de mezcla en que se encuentre), concentración del coagulante, temperatura (las bajas disminuyen la efectividad del proceso), y la calidad del agua.

No existe fórmula alguna que permita calcular a priori la concentración de coagulante necesaria para cada tipo de agua, por lo que debe recurrirse a métodos empíricos para su determinación. Por esa razón, se realizan pruebas (Ensayo de Jarras) utilizando diferentes concentraciones de coagulantes y floculantes a fin de evaluar los rendimientos de depuración esperables, y las dosis de reactivos necesarias para ello.

Teniendo en cuenta la importancia de los procesos de coagulación floculación en los procesos de potabilización y el tratamiento de aguas residuales, este trabajo también explora la posible influencia del TM en la disminución de reactivos químicos por su incidencia negativa en el medioambiente y como posible vía para el ahorro económico y la ecosostenibilidad.

El CM se ha aplicado con éxito con fines de separación, ya que en combinación con otros procesos, puede mejorar la eficiencia de la tecnología de purificación. Este tratamiento físico ayuda a evitar el uso de productos químicos como polifosfatos o sustancias corrosivas, que son caras y pueden ser perjudiciales para la vida humana o perjudiciales para el medio ambiente.

Higashitani (1996) investigó los efectos del CM en la estabilidad de partículas coloidales y sugirió que este, afecta la estabilidad coloidal alterando la estructura de las moléculas de agua y los iones adsorbidos en la superficie de la partícula, o en el medio. En consecuencia, las partículas fueron alineadas perpendicularmente a la dirección del campo magnético aplicado, resultando así en una mejora de la coagulación. La coagulación mejorada debido a la alineación de partículas también fue investigada por Wang et al. (1994), quien demostró un aumento en la tasa de agregación al tratar una solución con CM estático.

En los experimentos de Busch and Busch (1997), se atribuyó el efecto al fenómeno de cizalla que alteró las condiciones de flujo del fluido y produjo gradientes del diferencial de velocidad para las partículas coloidales. Los CM pueden también afectar los vórtices del flujo de fluidos. Tal gradiente de velocidad inducida magnéticamente también puede promover la coagulación.

Otros como Kney and Parsons (2006) propusieron que el mecanismo de superficie acelera la coagulación y la precipitación. Sakurazawa et al. (1999) demostraron que un CM de menos de 1 T alteró la orientación las moléculas en el CM que indudablemente facilitó la precipitación. Esta evidencia estaba de acuerdo con la de Wang et al. (1997) y Sorensen and Madsen (2000), quienes observaron una alteración de la precipitación de sales inorgánicas cuando se expone a un CM.

Por otro lado, también se encontró que el TM dinámico intenso reduce el potencial zeta en un 25 %, lo que aumentó la tendencia de la suspensión electrolítica a coagular (Gehr et al., 1995). Esto también está respaldado por la investigación anterior realizada por Ledion et al. (1980), quien observó una reducción de potencial zeta bajo la exposición de campos magnéticos.

Los resultados presentados por Coureoneaux-Font et al. (2025) demuestran que un CM estático es capaz de influir en el proceso de sedimentación y coagulación, ya que las partículas coloidales son las causantes de la turbiedad del agua y, para eliminarlas, se recurre al proceso de coagulación, infiriendo que el CM realiza una compresión de la doble capa y permite que las partículas coloidales se aglomeren para formar flóculos y facilitar su aglomeración.

Bajo las condiciones experimentales de la investigación de Martínez, se demuestra que la aplicación de esta tecnología en los procesos de potabilización de agua representa un ahorro de reactivo químico en el proceso de floculación de entre 15 y 20 % de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ que pueden representar un efecto económico de más de \$2000 en MN y 3000 en USD. También se constata que la formación de los flóculos del agua con TM comienza a observarse antes que el agua sin TM (Martínez Morales, 2007).

Waleed Alabdraba y colaboradores también estudian la influencia del CM en la eficiencia del proceso de coagulación para eliminar la turbidez y disminuir la dosis óptima de coagulante, haciendo uso de sulfato de alúmina como uno de sus coagulantes químicos y aplicando diferentes valores de intensidad. Los resultados mostraron

que el CM afecta clara y fuertemente a la hora de aumentar la eficiencia de la eliminación de las impurezas del agua (turbiedad reducida de 662 NTU a 0,36 NTU y de 45,25 NTU a 0 NTU), y sobre la reducción del coagulante químico (reducción de la dosis óptima de unos 10 mg/L). Él demuestra que la eficiencia del proceso de coagulación aumenta en gran medida con el CM y que es posible reducir la dosis óptima de coagulante mediante el uso de un CM adecuado (Alabdraba et al., 2013).

Nur Syamimi Zaidi define que el CM en combinación con otros procesos, puede mejorar la eficiencia de la tecnología de purificación. Agrega que este tratamiento físico ayuda a evitar el uso de productos químicos como polifosfatos o sustancias corrosivas, que son caras y pueden ser perjudiciales para la vida humana o perjudicial para el medio ambiente (Zaidi et al., 2014).

Vaillant López et al, evalúan el efecto del CM en los procesos de coagulación – floculación, la influencia en la formación de los flóculos a diferentes dosis de sulfato de aluminio, utilizando la Prueba de Jarras, para agua cruda previa a su tratamiento de potabilización. Se concluye que existe influencia directa del CM en cada una de las propiedades estudiadas antes y después de realizada la Prueba de Jarras, (aumento de pH al aplicar CM, disminución de conductividad, pH y turbidez luego de la Prueba de Jarras) bajo las condiciones establecidas de niveles de inducción de CM aplicados (330, 276 y 240 mT). Estos autores, demuestran que el TM incide en los procesos de coagulación-floculación para la potabilización de agua, propiciando una disminución en la dosis del coagulante aplicado en un 27 %. Además, pareciera que el TM puede mejorar la eficiencia de los coagulantes utilizados en el proceso de tratamiento de agua (Vaillant López et al., 2026).

En los últimos años, con el progreso continuo de la ciencia y la tecnología, han surgido nuevos métodos de tratamiento de agua por coagulación y floculación, entre los cuales la tecnología de floculación magnética ha recibido amplia atención por ser altamente eficiente y respetuoso con el medio ambiente (Hu et al., 2024).

A base de semillas magnéticas, la floculación magnética mejora la formación de partículas y acelera el proceso de sedimentación. En comparación con la coagulación convencional, la floculación magnética tiene las ventajas de un proceso corto, ahorro de energía y bajo costo. Esta tecnología promueve la coagulación y sedimentación de contaminantes mediante la adición de núcleos magnéticos o floculantes magnéticos al sistema de tratamiento, logrando así una rápida separación.

Para mejorar aún más la eficiencia y adaptabilidad del tratamiento, la tecnología de floculación magnética se ha combinado ampliamente con otras tecnologías de tratamiento de agua en los últimos años, creando varios procesos de tratamiento integrales.

04 CONCLUSIONES

La tecnología de CM es muy adecuada para varios tipos de entornos y aplicaciones de ingeniería. Resultados significativos de las aplicaciones magnéticas han sido demostrados bajo varios tipos de dispositivos y tratamientos magnéticos (imanes permanentes, corriente continua o alterna, imanes magnéticos adsorbentes, HGMS y superconductores).

El TM es una tecnología sostenible, de fácil aplicación y amigable con el medio ambiente. Su uso ahorra costos pues se compran en etapa de instalación y poseen altos rendimientos por varios años. Sus limitaciones constituyen desafíos que pueden superarse mediante una mayor investigación y mejora.

Con el uso de TM puede observarse la transformación de los cristales de calcita a aragonita; afectación del tamaño del cristal propiciando su crecimiento en el seno de la solución y su posterior precipitación en forma de una incrustación de fácil remoción, e inclusive, rompimiento o aglomeración del cristal propiciando que la incrustación formada sobre las paredes de las tuberías disminuya o sea menos densa.

Sin embargo, para el tratamiento de agua que contiene sílice, la exposición del CM debe realizarse de manera precisa para que se exponga una cantidad precisa de sílice, así, el proceso normal de cristalización de CaCO_3 puede ocurrir.

En combinación con otras técnicas, el TM puede mejorar la eficiencia de la tecnología de purificación en los procesos de coagulación y ayuda a evitar el uso de productos químicos.

05 REFERENCIAS

- Alabdraba, W., Bayati, M., Radeef, A., & Rejab, M. (2013). Influence of magnetic field on the efficiency of the coagulation process to remove turbidity from water. *International Review of Chemical Engineering*, 5(4).
- Alabi, A., Chiesa, M., Garlisi, C., & Palmisano, G. (2015). Advances in anti-scale magnetic water treatment. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 1, 408–425. <https://doi.org/10.1039/C5EW00052A>
- Alimi, F. (2024). Effect of magnetic treatment on seawater determined by quartz crystal microbalance: Crystal deposition mechanisms. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 14(4), 14894–14898. <https://www.etasr.com>
- Alimi, F., Tlili, M., Ben Amor, M., Gabrielli, C., & Maurin, G. (2007). Influence of magnetic field on calcium carbonate precipitation. *Desalination*, 206(1-3), 163–168. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.02.064>
- Alimi, F., Tlili, M. M., Ben Amor, M., Maurin, G., & Gabrielli, C. (2009). Effect of magnetic water treatment on calcium carbonate precipitation: Influence of the pipe material. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 48(8), 1327–1332. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2009.06.008>
- Antony, A., How Low, J., Gray, S., Childress, A., Le Clech, P., & Greg, L. (2011). Scale formation and control in high pressure membrane water treatment systems: A review. *Journal of Membrane Science*, 383, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2011.08.054>
- Arias Gilart, R., Berenguer Ungaro, M., Vázquez Nigorenko, J. A., Silveira Font, Y., & Alfaro Rodríguez, C. E. (2018). Disminución de las emisiones de monóxido de carbono con el tratamiento magnético del combustible. *Centro Azúcar*, 45, 21–31.
- Bolívar, G. (2019). Carbonato de calcio: Estructura, propiedades, formación, usos. <https://www.lifeder.com/carbonato-de-calcio/>
- Busch, K. W., & Busch, M. A. (1997). Laboratory studies on magnetic water treatment and their relationship to a possible mechanism for scale reduction. *Desalination*, 109(2), 131–148. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(97\)00059-3](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(97)00059-3)
- Campos, S. M., Moro-Martínez, A., León-Cañet, M., Silveira-Font, Y., & Falcón-Hernández, J. (2015). Tratamiento magnético sobre parámetros físico-químicos de muestras de petróleo. *Tecnología Química*, 35(3), 271–281.
- Cefalas, A. C., Kobe, S., Dražič, G., Sarantopoulou, E., Kollia, Z., Stražišar, J., & Meden, A. (2008). Nanocrystallization of CaCO_3 at solid/liquid interfaces in magnetic field: A quantum approach. *Applied Surface Science*, 254(21), 6715–6724. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2008.04.056>
- Chibowski, E., Hołysz, L., & Szcześ, A. (2003). Adhesion of in situ precipitated calcium carbonate in the presence and absence of magnetic field in quiescent conditions on different solid surfaces. *Water Research*, 37(19), 4685–4692. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2003.07.001>
- Chibowski, E., & Szcześ, A. (2018). Magnetic water treatment — a review of the latest approaches. *Chemosphere*, 203, 54–67. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.03.160>
- CNEA. (2011). Uso del tratamiento magnético al agua en santiago de cuba. <https://magnetismocnea.wordpress.com/2011/05/04/uso-del-tratamiento-magnetico-al-agua-en-santiago/>
- Coey, J. M. D. (2012). Magnetic water treatment — how might it work? *Philosophical Magazine*, 92(31), 1–9. <https://doi.org/10.1080/14786435.2012.685968>
- Coey, J. M. D., & Cass, S. (2000). Magnetic water treatment. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 209(1-3), 71–74. [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(99\)00648-4](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(99)00648-4)
- Coureoneaux-Font, C., Ribeaux-Kindelán, G., & del Toro Álvarez, D. (2025). Influencia de un campo magnético estático en el proceso de coagulación. *ICIDCA sobre los derivados de la caña de azúcar*, 59(2), 61–64. <https://www.revista.icidca.azcuba.cu/wp-content/uploads/2025/07/articulo-7.pdf>

- Espinoza, M. A. (2019). Tecnología del tratamiento magnético del agua. <https://es.linkedin.com/pulse/tecnologia-del-tratamiento-magnetico-agua-marco-antonio-espinoza>
- Gabrielli, C., Jaouhari, R., Maurin, G., & Keddah, M. (2001). Magnetic water treatment for scale prevention. *Water Research*, 35(13), 3249–3259.
- Gálvez Vidaurre, C. (2010). Uso del desincrustante magnético (dm) para mejorar la calidad del agua en la industria. *Ingeniería Industrial*, 28(028), 139–154. <https://doi.org/10.26439/ing.ind2010.n028.244>
- Gao, F., Zheng, Y., Li, J., Yin, Y., Jia, H., & Wang, J. (2024). Magnetization-coupled reverse osmosis (ro): Enhanced scale inhibition mechanisms and operational optimization. *Chemical Engineering Science*, 286, 119650. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2023.119650>
- Ge, H., Gong, X., Liu, R., Meng, X., & Gu, Y. (2010). Scale inhibition of electromagnetic water treatment and corrosion behavior of carbon steel in simulated water. *4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering (iCBBE)*.
- Gehr, R., Zhai, Z. A., Finch, J. A., & Rao, R. (1995). Reduction of soluble mineral concentrations in caso4 saturated water using a magnetic field. *Water Research*, 29(3), 933–940. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(94\)00214-R](https://doi.org/10.1016/0043-1354(94)00214-R)
- Hafidi, M. Y., & Hafidi, M. E. (2017). Existing scale deposits removal by magnetic water treatment: Theoretical study and experiment. *International Journal of Water and Wastewater Treatment*, 3(3). <https://doi.org/10.16966/2381-5299.143>
- Higashitani, K. (1996). Effects of magnetic field on stability of non-magnetic colloidal particles. *Proceedings of the 2nd International Meeting on Anti-Scale Magnetic Treatment*.
- Higashitani, K., Okuhara, K., & Hatade, S. (1992). Effects of magnetic fields on stability of non-magnetic ultrafine colloidal particles. *Journal of Colloid and Interface Science*, 152(1), 125–131. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(92\)90013-C](https://doi.org/10.1016/0021-9797(92)90013-C)
- Hu, Z., Wu, K., Wang, Z., Shah, K. J., & Sun, Y. (2024). Research progress on magnetic flocculation in water treatment. *Magnetochemistry*, 10(56). <https://doi.org/10.3390/magnetochemistry10080056>
- Kney, A. D., & Parsons, S. A. (2006). A spectrophotometer-based study of magnetic water treatment: Assessment of ionic vs. surface mechanisms. *Water Research*, 40(3), 517–524. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.11.019>
- Kobe, S., Dražič, G., McGuinness, P. J., Meden, T., Sarantopoulou, E., Kollia, Z., & Cefalas, A. C. (2003). Control over nanocrystallization in turbulent flow in the presence of magnetic fields. *Materials Science and Engineering*, 23(6), 811–815. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2003.09.136>
- Kobe, S., Dražič, G., McGuinness, P. J., & Stražičar, J. (2001). The influence of the magnetic field on the crystallisation form of calcium carbonate and the testing of a magnetic water-treatment device. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 236(1), 71–76. [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(01\)00432-2](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(01)00432-2)
- Ledion, J., Leroy, P., Labbe, J. P., Durand, G., & Duigou, A. L. (1980). Scaling caused by natural water and the action of electric anti-scaling devices. *Matériaux et Techniques*, 68, 139–144.
- Lipus, L. C., & Dobersek, D. (2007). Influence of magnetic field on the aragonite precipitation. *Chemical Engineering Science*, 62(7), 2089–2095. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2006.12.051>
- Mahmoud, B., Yosra, M., & Nadia, A. (2016). Effects of magnetic treatment on scaling power of hard waters. *Separation and Purification Technology*, 171, 88–92. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.07.027>
- Martínez Morales, E. (2007). *La magnetización aplicada a la potabilización de agua* [Tesis de Maestría]. Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”.
- Martínez Moya, S., Boluda Botella, N., & García Quiles, J. (2019). Técnicas electromagnéticas para el tratamiento de aguas y diseño de una planta piloto con dispositivo tk3k. *Congreso Nacional del Agua Orihuela 2019: innovación y sostenibilidad*, 1003–1014.
- Piyadasa, C., Yeager, T., Gray, S. R., Stuart, M. B., Ridgway, H. F., Pelekani, C., & Orbell, J. D. (2018). Antimicrobial effects of pulsed electromagnetic fields from commercially available water treatment devices — controlled studies under static and flow conditions. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 93(3), 871–877.

- Ribeaux Kindelán, G. (2011). *Efecto de un campo magnético estático sobre la cristalización de la sacarosa en solución* [Tesis de Doctorado en Ciencias Técnicas]. Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado, Universidad de Oriente.
- Ribeaux Kindelán, G., & Mesa Pérez, J. M. (2001). Evaluación del sistema de evaporación del cai américa libre de santiago de cuba, con y sin la aplicación de la tecnología del tratamiento magnético. *Tecnología Química*, 21(2).
- Sakurazawa, S., Kubota, T., & Ataka, M. (1999). Orientation of protein crystals grown in a magnetic field. *Journal of Crystal Growth*, 196(2), 325–331. [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(98\)00841-0](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(98)00841-0)
- Salman, M. A., Al-Nuwaibit, G., Safar, M., & Al-Mesri, A. (2015). Performance of the physical treatment method and various commercial antiscalants for controlling scale deposition in desalination plants. *Desalination*, 369, 18–25. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.04.023>
- Shahwan, T., Üzüüm, Ç. A., & Eroğlu, E. (2010). Synthesis and characterization of bentonite/iron nanoparticles and their application as adsorbent of cobalt ions. *Applied Clay Science*, 47(3-4), 257–262. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2009.10.019>
- Shi, H. S. (2014). *Effect of magnetic field on scale removal in drinking water pipeline* [Master Thesis]. Faculty of Civil Engineering, Universiti Teknologi Malaysia.
- Sorensen, J. S., & Madsen, H. E. L. (2000). The influence of magnetism on precipitation of calcium phosphate. *Journal of Crystal Growth*, 216(1-4), 399–406.
- Szkatula, A., Balanda, M., & Kopeć, M. (2002). Magnetic treatment of industrial water. silica activation. *European Physical Journal: Applied Physics*, 18(1), 41–49. <https://doi.org/10.1051/epjap:2002025>
- Vaca Jiménez, S. (2014). Aplicación de un campo magnético ortogonal al flujo en sistemas de agua para reducir la formación de incrustaciones. *Revista de la Facultad de Ciencias Químicas, Universidad de Cuenca*, 10.
- Vaillant López, N., Carreras Fernández, G., & Ribeaux Kindelán, G. (2022). Efectos del campo magnético en la dureza total, calor específico y punto de ebullición del agua. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 43(4), 76–87. <https://riha.cujae.edu.cu/index.php/riha/article/view/611>
- Vaillant López, N., Olivero Fortune, T., Carreras Fernández, G., & Ribeaux Kindelán, G. (2026). Influence of magnetic treatment on the coagulation-flocculation process for water purification. In *Advances in technical sciences and architecture* (pp. 393–406). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-3-031-96157-1_28
- Verdú, D. (2016). *Efecto del electromagnetismo sobre la dureza del agua* [Trabajo fin de máster]. Universidad de Alicante.
- Vermeiren, T. (1958). Magnetic treatment of liquids for scale and corrosion prevention. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 5(7).
- Wang, Y., Babchin, A. J., Chernyi, L. T., Chow, R. S., & Sawatzky, R. P. (1997). Rapid onset of calcium carbonate crystallization under the influence of a magnetic field. *Water Research*, 31(2), 346–350. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(96\)00243-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(96)00243-6)
- Wang, Y., Pugh, R. J., & Forssberg, E. (1994). The influence of inter-particle surface forces on the coagulation of weakly magnetic mineral ultrafine in a magnetic field. *Colloids and Surfaces A*, 90(2-3), 117–133.
- Xi, Z., Xiong, L., Gao, B., Cheng, C., Lai, Q., & Wei, E. (2010). The design and experimental research of high-power and high-frequency electromagnetic anti-scaling system. *3rd International Conference on Biomedical Engineering and Informatics*, 1318–1321. <https://doi.org/10.1109/BMEI.2010.5639257>
- Zaidi, N. S., Sohaili, J., Muda, K., & Sillanpää, M. (2014). Magnetic field application and its potential in water and wastewater treatment systems. *Separation & Purification Reviews*, 43(3), 206–240. <https://doi.org/10.1080/15422119.2013.794148>
- Zhao, J., Liu, Z., & Zhao, E. J. (2014). Combined effect of constant high voltage electrostatic field and variable frequency pulsed electromagnetic field on the morphology of calcium carbonate scale in circulating cooling water systems. *Water Science and Technology*, 70(6), 1074–1082. <https://doi.org/10.2166/wst.2014.337>

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

ORCID de los autores

Nuria de los Ángeles Vaillant López <https://orcid.org/0000-0001-7362-084X>

Guillermo Ribeaux Kindelán <https://orcid.org/0000-0002-0870-0613>