

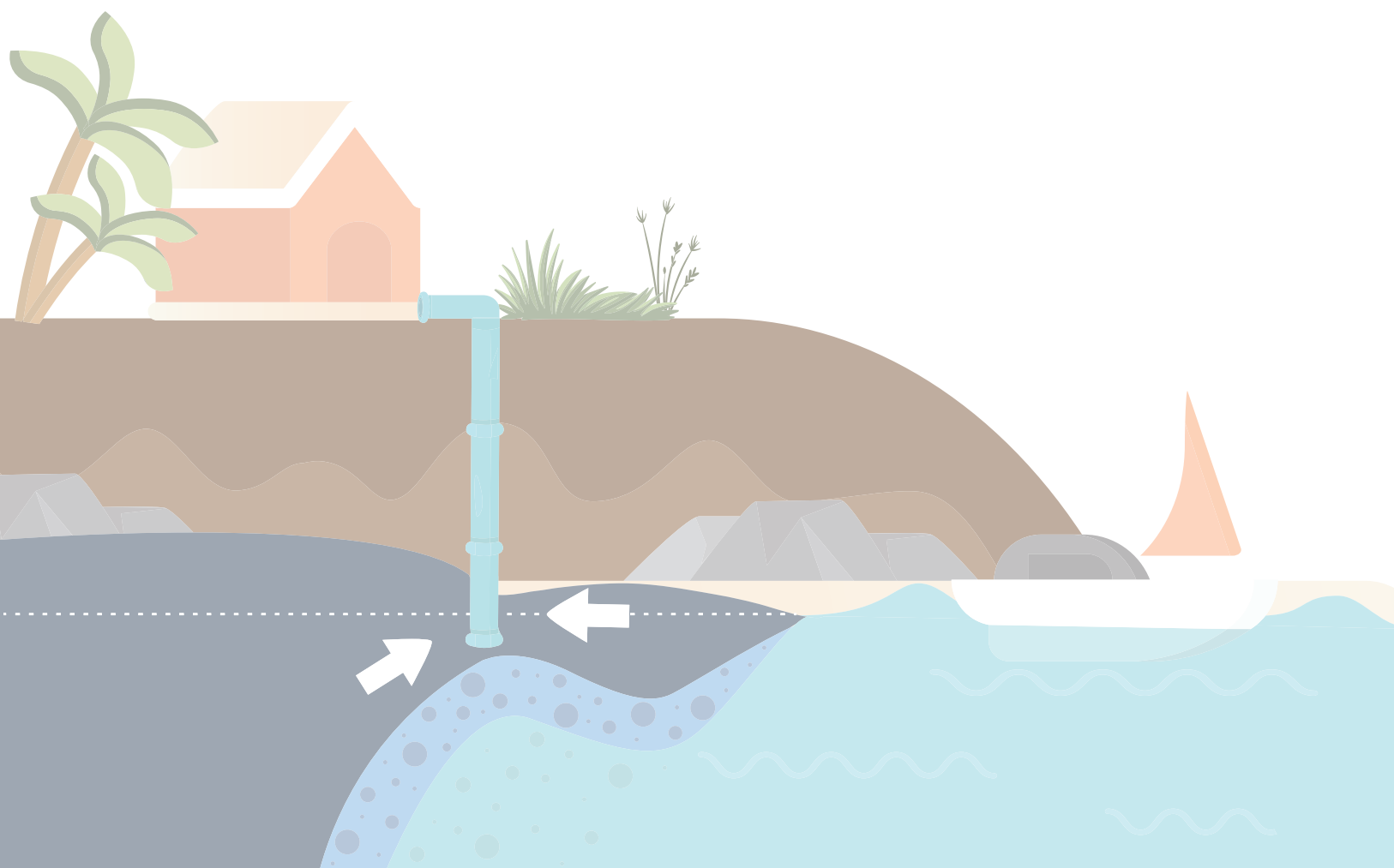


IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA DINÁMICA DE LA INTRUSIÓN MARINA EN ACUÍFEROS COSTEROS DEL DISTRITO DE LAS TABLAS, PROVINCIA DE LOS SANTOS: DELIMITACIÓN DE ZONAS VULNERABLES A LA CONTAMINACIÓN SALINA





IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA DINÁMICA DE LA INTRUSIÓN MARINA EN ACUÍFEROS COSTEROS DEL DISTRITO DE LAS TABLAS, PROVINCIA DE LOS SANTOS: DELIMITACIÓN DE ZONAS VULNERABLES A LA CONTAMINACIÓN SALINA



IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA DINÁMICA DE LA INTRUSIÓN MARINA EN ACUÍFEROS COSTEROS DEL DISTRITO DE LAS TABLAS, PROVINCIA DE LOS SANTOS: DELIMITACIÓN DE ZONAS VULNERABLES A LA CONTAMINACIÓN SALINA

Este trabajo se pudo llevar a cabo gracias a la subvención de la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación de Panamá (SENACYT), para la ejecución del proyecto *“Impacto del cambio climático en la dinámica de la intrusión marina en acuíferos costeros del Distrito de Las Tablas, Provincia de Los Santos: Delimitación de zonas vulnerables a la contaminación salina”*. Las opiniones expresadas en esta publicación, no reflejan necesariamente los puntos de vista de SENACYT.

Esta publicación puede ser reproducida en su totalidad o en parte, y en cualquier forma, para fines educativos o sin fines de lucro, sin permiso especial del titular de los derechos de autor, siempre que se cite la fuente.

Para mayor información:

Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latina y el Caribe (CATHALAC) www.cathalac.int
Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT) www.senacyt.gob.pa



CATHALAC es un organismo internacional con sede en la ciudad de Panamá, establecido en 1992 para promover el desarrollo sostenible en los países del trópico húmedo de América Latina y el Caribe, por medio de la investigación aplicada, la educación y la transferencia de tecnología de los recursos hídricos y el ambiente. Las áreas de trabajo de CATHALAC se enfocan en lo siguiente: Gestión integrada de cuencas, gestión de riesgo, cambio climático y modelación y análisis ambiental.



La Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación es una institución autónoma, que fue creada por la Ley 13 de 15 de abril de 1997, modificada posteriormente por la Ley 50 de 21 de diciembre de 2005 y por la Ley 55 de 14 de diciembre de 2007, que le confirió autonomía a la institución en sus tareas administrativas. Todas las actividades, proyectos y programas de la SENACYT, tienen como objetivo fortalecer, apoyar, inducir y promover el desarrollo de la ciencia, la tecnología y la innovación con el propósito de elevar el nivel de productividad, competitividad y modernización en el sector privado, el gobierno, el sector académico-investigativo, y la población en general.

El Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latina y el Caribe (CATHALAC), agradecerá recibir una copia de cualquier publicación que utilice este documento como fuente. Ningún uso de esta publicación puede ser para su venta o para cualquier otro propósito comercial.

Copyright (derechos de autor) © 2025,
CATHALAC, SENACYT

Autor: Valentina Opolenko y Manuel Olías
Editores: Freddy Picado, Margarita Chiurliza
Colaboradores: Francisco Moral, Antonia Jiménez, José Fábrega, Tania Maure y Obed Acosta

Ilustraciones: CATHALAC

Diseño e Impresión: De Todo en Mercadeo (DTEM)

CONTENIDO

	RESUMEN.....	1
01	INTRODUCCIÓN.....	2
	1.1 Aspectos básicos sobre acuíferos costeros.....	2
	1.2 Generalidades sobre la explotación de acuíferos costeros en Panamá.....	4
	1.3 Área de estudio.....	6
02	CONSIDERACIONES SOBRE ACUÍFEROS COSTEROS.....	10
	2.1 La intrusión marina: aproximación conceptual e hidrodinámica.....	10
	2.2 Vulnerabilidad de acuíferos a la intrusión marina: Método GALDIT.....	13
03	ACUÍFEROS COSTEROS DEL DISTRITO DE LAS TABLAS.....	15
	3.1 Marco metodológico.....	15
	3.2 Resultados de la exploración geológica y geofísica.....	17
	3.3 Características hidrogeológicas.....	19
	3.4 Cálculo de la profundidad de la interfase en condiciones naturales.....	24
	3.5 Cálculo de la vulnerabilidad del acuífero costero a la intrusión marina.....	25
	CONCLUSIONES.....	32
	AGRADECIMIENTOS.....	35
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	35

Impacto del cambio climático en la dinámica de la intrusión marina en acuíferos costeros del Distrito de Las Tablas, Provincia de Los Santos: Delimitación de zonas vulnerables a la contaminación salina



RESUMEN

El cambio climático tiene efectos directos en el aumento de fenómenos meteorológicos extremos e incremento del nivel del mar, impactando en las actividades humanas que desmejoran su calidad de vida. El área de estudio se localiza en la zona costera del distrito de Las Tablas, donde sus acuíferos están siendo explotados para distintos usos a través de numerosos pozos. Debido a esta sobreexplotación y el aumento del nivel del mar, la intrusión marina ya está afectando a los acuíferos. El objetivo principal de la investigación, fue evaluar la vulnerabilidad a la contaminación por intrusión marina del acuífero costero del distrito de Las Tablas, debido al incremento en el nivel del mar asociado al cambio climático y la presión antrópica sobre este recurso hídrico.

A medida que aumenta la escasez de agua y la variabilidad hidrológica es mayor, afrontar los cambios provocados por el desarrollo humano, constituye un desafío extraordinario debido a enormes presiones, riesgos y conflictos que surgen por el uso del agua. Como resultados del proyecto, fueron elaborados estudios técnicos, modelos, mapas y conocimientos difundidos para potenciar la investigación a nivel nacional en aspectos hidrogeológicos, climáticos y de resiliencia hídrica.

Con la ejecución de este proyecto piloto, se sentaron por primera vez en Panamá las bases metodológicas para adquirir los conocimientos necesarios encaminados a la gestión sostenible de los acuíferos en zonas costeras, amenazados por la contaminación marina. Estos criterios fueron compartidos con los gestores y usuarios de los recursos hídricos subterráneos, para que puedan aprovecharlos, abandonando el esquema existente de simple extracción descontrolada, no sólo en la zona donde se trabajó, sino a nivel nacional.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Aspectos básicos sobre acuíferos costeros

Las concentraciones de gases de efecto invernadero, según el de la Organización Meteorológica Mundial, alcanzaron en 2023 un nivel récord debido a que nunca antes en la historia de la humanidad, la acumulación de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera había sido tan rápida: en solo veinte años, el aumento llegó a un 11.4 % (WMO, 2024). Este alarmante aumento de las emisiones de los gases de efecto invernadero a la atmósfera, siendo ellos en su gran parte producto de las crecientes actividades antrópicas, conducen a las inevitables futuras subidas de las temperaturas, contribuyendo de esta manera al calentamiento global del planeta. Como resultado, los cambios de patrones de temperatura y respectivamente de precipitaciones, conllevan a que los fenómenos climáticos extremos se presentan cada vez más largos e intensos, y también se dan con mayor frecuencia, incrementando el nivel medio global del mar, así como el calentamiento oceánico (IPCC, 2019).

Se considera que el aumento del nivel medio del mar es uno de los cambios ambientales más influyentes y, según estudios recientes (Hamlington et al., 2024), esto afecta directamente a ecosistemas costeros en todo el mundo. La amenaza constante de la subida del nivel del mar también afecta a los sistemas sociales y económicos, rompiendo el equilibrio entre la naturaleza y seres humanos. Está previsto que la variabilidad climática cause mayores variaciones en precipitaciones y evapotranspiración, por lo tanto, las fuentes de agua superficial sufrirán mayor estrés hídrico en el futuro. La creciente incertidumbre respecto de su disponibilidad, ya está provocando que la demanda por fuentes subterráneas aumente notablemente como mecanismo de protección contra las sequías, específicamente en regiones con el significativo desarrollo socioeconómico de la población y de la agricultura de regadío. Al aumentar la presión sobre los acuíferos costeros, esto contribuye al agravamiento de los fenómenos de intrusión marina. La dinámica de la intrusión marina en acuíferos costeros a consecuencia del aumento del nivel del mar y de la explotación de los acuíferos costeros, es un tema de extrema relevancia actual y futura, ya que estos acuíferos son muchas veces la fuente principal, o a veces la única, de agua para los habitantes.

Se define por la intrusión marina en acuíferos costeros a un proceso natural o por actividades humanas, en el cual el agua salada incursiona permanente o temporalmente tierra adentro, desplazando el agua dulce, debido a la diferencia de densidades, siendo el agua salada de mayor densidad. Al introducirse el agua de mar tierra adentro se produce una mezcla de ambos tipos de aguas, reduciendo a su vez la calidad de las reservas de agua dulce. Por lo tanto, la intrusión marina en acuíferos costeros se

considera un fenómeno muy complejo bajo el punto de vista hidrodinámico e hidrogeoquímico, ya que conlleva aspectos de evaluación, cálculo, predicción y corrección, que son conceptual y cuantitativamente difíciles, entre los cuales se resaltan las características locales por tener una influencia dominante (Custodio, 2013). En consecuencia, la penetración de la cuña salina se transforma en un proceso inevitable y difícil de remediar.

La *vulnerabilidad a la intrusión marina* puede definirse, según las numerosas referencias en la literatura técnica, como una probabilidad de penetración con que un contaminante, en este caso concreto sería el agua salada, alcanza una posición específica en un sistema acuífero costero. Esta introducción de agua salada en alguna posición de la zona saturada, genera el desplazamiento de agua dulce, teniendo como una principal consecuencia la alteración de la calidad de las aguas del acuífero por la mezcla entre el agua dulce y la salada. El concepto de vulnerabilidad fue introducido en 1968 por el hidrogeólogo francés J. Margat, y se refiere al riesgo de que las aguas subterráneas se contaminen con sustancias en concentraciones que superen los valores recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Desde este año, cuando fue acuñado por Margat el término de “vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación” hasta la fecha, existe un número plural de definiciones sobre el mismo, y metodologías de su cualificación y representación cartográfica. Por ejemplo, según Foster e Hirata (2013) citando a Margat, el concepto trató de representar la sensibilidad de un acuífero a ser impactado negativamente en un punto determinado por una presión (o carga) contaminante, impuesta desde la superficie terrestre y se basa en la tesis de que el medio geológico y la cubierta edafológica proporcionan un cierto grado de protección de las aguas subterráneas frente a contaminantes de origen tanto natural, como derivados de actividades humanas.

Mientras tanto, el otro concepto estrechamente asociado a la vulnerabilidad, es el de *riesgo de contaminación a la intrusión marina*, que depende de factores intrínsecos y los mismos están determinados básicamente por las características del acuífero, su tipo y tamaño, así como de los parámetros hidráulicos, los que son relativamente estáticos (es decir, permanentes a escalas razonables de tiempo) y por la existencia de factores extrínsecos como la recarga natural o artificial, la explotación del acuífero (bombeo) y las actividades potencialmente contaminantes, las que son esencialmente dinámicas (MOP, 2004). Debido a la influencia e interrelación de estos factores múltiples, la caracterización del proceso de la intrusión marina en la zona costera es considerada compleja y sólo en aproximaciones muy simples se puede hacer con criterios universales, debido a que la evaluación espacial y temporal de la intrusión marina requiere un tratamiento específico en cada caso, que debe fundamentarse en el conocimiento del funcionamiento hidrogeológico del acuífero afectado y en la información obtenida de las redes de control y seguimiento (IGME, 2009).

El tema de la gestión de los recursos hídricos en Panamá toma la mayor relevancia, específicamente en las zonas costeras del país. Esto se debe a que el istmo de Panamá posee una importante longitud de costas, de casi 3,000 kilómetros, de los cuales 1,700 km corresponden al litoral pacífico (IHCantabria, 2023), donde la presión demográfica aumenta constantemente, provocando el incremento en la deforestación y ocupación de tierras, disminuyendo la capacidad de infiltración de los suelos, afectando a la recarga de acuíferos, generando el estrés hídrico (MiAMBIENTE, 2020).

1.2 Generalidades sobre la explotación de acuíferos costeros en Panamá

Para poder mitigar adecuadamente los riesgos del fenómeno de la intrusión marina en los acuíferos costeros, es importante contar con los conocimientos y aplicar las políticas públicas necesarias de adaptación. Tomando en consideración a los grandes cambios que se han producido a nivel mundial, así como en la República de Panamá, a consecuencia de nuevos conocimientos científicos y tecnológicos, este acelerado desarrollo ha impactado de manera directa en seres humanos, en el medioambiente, así como en la disponibilidad de los recursos hídricos. A medida que aumenta la escasez de agua y la variabilidad hidrológica es mayor, afrontar los cambios provocados por el desarrollo constituye un desafío extraordinario debido a enormes presiones, riesgos y conflictos que surgen por el uso de recursos hídricos.

Siendo Panamá un país tropical, con grandes extensiones de costas, donde habita aproximadamente el 50% de la población panameña, se caracteriza por su gran diversidad de ecosistemas y accidentes costeros y por su relevancia socio-económica. Esta presión demográfica que va en constante aumento, el creciente desarrollo económico de la región y los efectos del cambio climático con la disminución de lluvias, aumento de temperaturas y del nivel medio del mar (IPCC, 2019), afectan drásticamente a la disponibilidad de los recursos hídricos, incluyendo al agua subterránea. También en la Península de Azuero, siendo el distrito de Las Tablas el área de estudio, con su vasta zona costera que forma parte del Arco Seco de Panamá y abastecida en gran parte por el agua subterránea, la población en las últimas décadas se siente vulnerable y bajo riesgo debido a la falta de este preciado líquido durante la estación seca (verano) o el evento climático El Niño. Como resultado, al utilizar los recursos hídricos de forma insostenible, sobreexplotando los numerosos pozos, es muy probable que con el avance del tiempo se genere el estrés hídrico en sitios con mala o deficiente distribución hídrica (MiAmbiente, 2020), lo que daría origen y/o intensifique el problema de contaminación de los acuíferos por la intrusión marina.

Con el fin de evaluar la vulnerabilidad a la contaminación por intrusión marina en acuíferos costeros en la región de Azuero, debido al incremento en el nivel del mar

asociado al cambio climático y la presión sobre el recurso hídrico por el desarrollo de actividades humanas, el equipo de investigación del Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latina y el Caribe (CATHALAC), en colaboración con la Universidad Pablo de Olavide (UPO) de Sevilla, Universidad de Huelva (UHU) y la Universidad Tecnológica de Panamá (UTP) (Figura 1), realizó en el período de 2022 a 2024 con el financiamiento de la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT), el proyecto denominado *“Impacto del cambio climático en la dinámica de la intrusión marina en acuíferos costeros del Distrito de Las Tablas, Provincia de Los Santos: Delimitación de zonas vulnerables a la contaminación salina”*.

Figura 1. Equipo de investigación del proyecto: Seminario Científico Técnico, ciudad de Las Tablas (31 de enero de 2024)



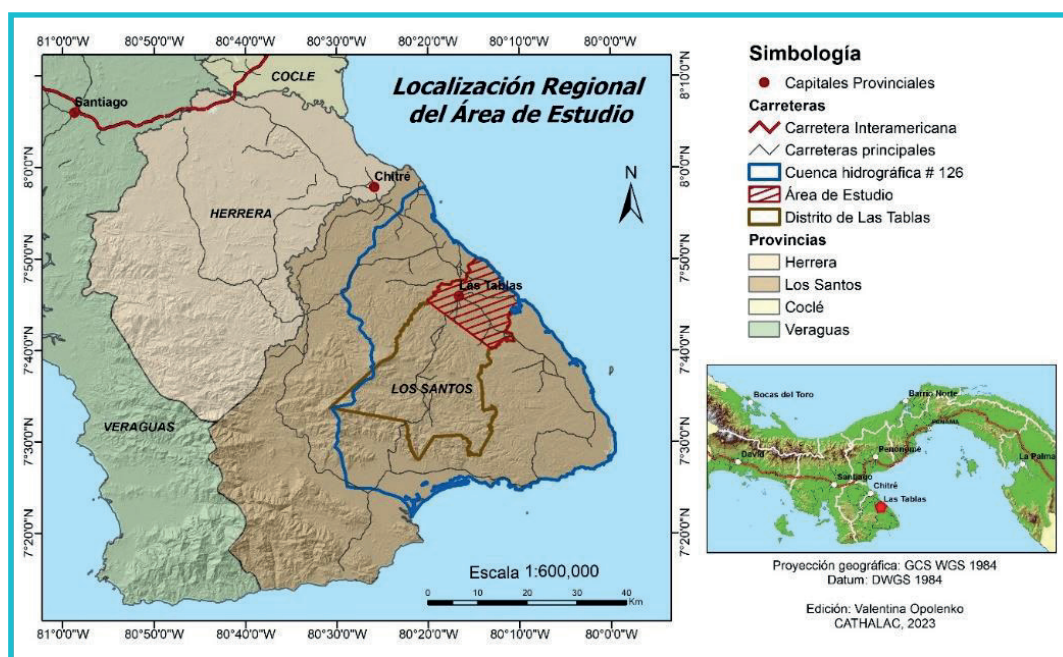
El objetivo general de esta investigación fue evaluar la vulnerabilidad a la contaminación por intrusión marina del acuífero costero del distrito de Las Tablas, provincia de Los Santos, debido al incremento en el nivel del mar asociado al cambio climático y la presión sobre el recurso hídrico generada por el desarrollo de actividades humanas.

Se abordaron dos fenómenos actuales de suma importancia: el llamado cambio global, donde el principal agente natural modificador es el cambio climático, y su relación con la intrusión del agua de mar en las cuencas costeras, ambos de extrema complejidad funcional y de evidente impacto socioeconómico, relacionados entre sí y con el factor antrópico. La información generada en esta investigación servirá de base para las entidades relacionadas con el manejo de los recursos hídricos para que puedan tomar decisiones acertadas, así como brindar información necesaria a los usuarios para una adecuada utilización y/o protección de dichos recursos.

1.3 Área de estudio

El área de estudio comprende un sector central de la parte baja de la cuenca hidrográfica No. 126 “Ríos entre Río Tonosí y Río La Villa”, que se localiza en la vertiente del Pacífico, en extremo sureste de la Península de Azuero (IGNTG, 2007), a unos 300 km de la ciudad de Panamá, capital de la República. Es una zona costera del distrito de Las Tablas, que cuenta, según el INEC (2023), con una población estimada de unas 27 mil personas (Figura 2).

Figura 2. Localización regional y división administrativa del área de estudio



El área de estudio, de aproximadamente de 180 km², es una franja que tiene la longitud por la costa de unos 15 kilómetros y 12 km lineales tierra adentro. El distrito de Las Tablas se considera un importante centro económico de la provincia de Los Santos, que se ubica en el extremo este de la península de Azuero. Forma parte del llamado Arco Seco de Panamá, una región que comprende las llanuras y colinas costeras orientales de las provincias de Los Santos y Herrera, así como el litoral Sur de la provincia de Coclé.

Es un territorio desfavorecido climáticamente, con las precipitaciones anuales menores del país, variando entre los 900 y 1500 mm/año, que frecuentemente enfrenta los mayores periodos de déficit hídrico y sequías a consecuencia de la variabilidad climática natural de la zona y los eventos meteorológicos extremos. Además, fue sometido durante décadas a una intensa degradación ambiental, en especial de los suelos y recursos hídricos, que se manifiesta a través del uso intensivo de agroquímicos, las prácticas de cultivos no apropiados para la vocación del suelo, sobreexplotación de acuíferos y la falta de sistematización de la gestión de sistemas de riego, entre otros, con los consiguientes

perjuicios para el buen funcionamiento de muchos de los ecosistemas de la zona (Opolenko, 2016). Esta situación desfavorable implica que los acuíferos costeros del área de estudio, están siendo sobreexplotados a través de una gran cantidad de pozos profundos, que se usan para abastecer de agua prácticamente a todas las actividades turísticas, agrícolas, industriales y también para suplir las necesidades de la población local.

El relieve del área del estudio se caracteriza por la presencia de un amplio sector de tierras bajas (llanuras) y por tierras con colinas suaves, cuyos alineamientos muestran signos de avanzados procesos de erosión y efecto degradante de las actividades agropecuarias (Figura 3). La elevación media en esta zona es de unos 80 metros sobre el nivel del mar (IGNTG, 2007).

Figura 3. Relieve del área del estudio con llanuras y zonas de la línea costera.



El marco geológico de la zona costera del distrito de Las Tablas, que comprende el área de la investigación, se desarrolla en un ambiente complejo por su evolución histórica de pequeño arco de islas y mares poco profundos a un istmo afectado por intensa actividad volcánica acompañada de emersiones, regresiones y movimientos tectónicos con vectores multidireccionales, erosión y sedimentación (CARTAP, 1968). Según el Mapa Geológico de la República de Panamá (DGRM, 1991), el conjunto de formaciones geológicas que constituyen el área investigada es representado por las rocas de origen ígneo y sedimentario. Entre las rocas ígneas se distinguen dos tipos: plutónicas y volcánicas. La evolución de la geología histórica de la zona investigada, muestra un cuadro de intercalamientos de formaciones sedimentarias, ígneas efusivas e intrusivas, que posteriormente fueron afectadas por levantamientos y movimientos tectónicos, que han moldeado con importantes fallas regionales, su configuración actual.

Consiste en tres formaciones geológicas: la formación sedimentaria Macaracas (TO-MAC), que es de mayor extensión, la formación plutónica Valle Riquito (TEO-RIQ) y la

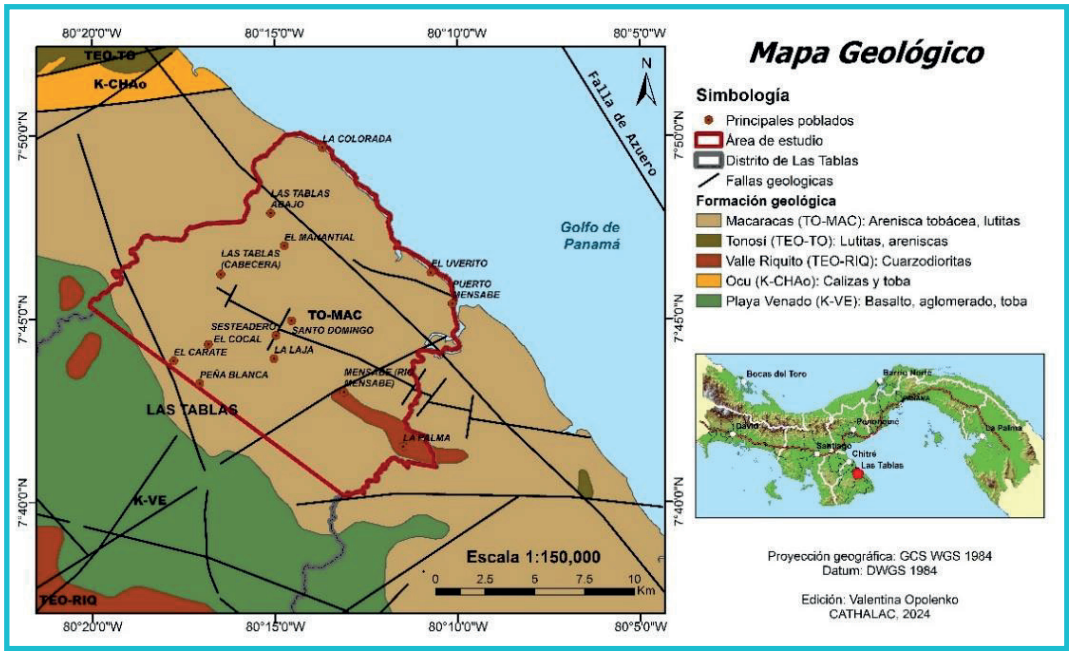
formación volcánica Playa Venado (K-VE). Estas dos últimas afloran en una extensión muy pequeña. Cabe destacar que en el área de estudio también se encuentran presentes de manera dispersa algunas estructuras conocidas como diques, que son intrusiones más recientes de escapes de lava u otro tipo de material ígneo, incrustadas en material preexistente, por lo general de forma tabular (Tabla 1 y Figura 4).

Tabla 1. Formaciones geológicas y la litología del área de estudio

Periodo	Formación	Símbolo	Descripción
<i>Formaciones Sedimentarias</i>			
Paleógeno	Macaracas	TO-MAC	Lutita y areniscas tobáceas
<i>Formaciones Plutónicas (Intrusivas)</i>			
Paleógeno	Valle Riquito	TEO-RIQ	Cuarzodioritas
<i>Formaciones Volcánicas (Extrusivas)</i>			
Cretácico	Playa Venado	K-VE	Basaltos, aglomerado, tobas

Fuente: Elaboración propia a partir de DGRM, 1991

Figura 4. Mapa geológico del área de investigación



Fuente: Elaboración propia a partir de DGRM, 1991

- La formación Macaracas (TO-MAC) del Período Paleógeno, que aflora en superficie en gran parte del área de estudio, se haya fuertemente meteorizada y presenta una potente cubierta edáfica. La composición de esta formación geológica está representada principalmente por rocas como areniscas tobáceas y lutitas. La recarga de agua procede fundamentalmente de la infiltración parcial de las lluvias, aunque puede tener un componente lateral de flujo subterráneo procedente de las tierras

altas vecinas.

- La formación Valle Riquito (TEO-RIQ), también del Período Paleógeno, forma parte de las rocas plutónicas intrusivas, está constituida principalmente por rocas masivas y compactas como la cuarzodiorita. Por lo tanto, es una formación con escasas propiedades acuíferas, teniendo alguna posibilidad menor en la cubierta de suelo y la capa de roca meteorizada de los sectores donde aflora en superficie.
- La formación Playa Venado (K-VE) está compuesta mayormente por coladas de lavas basálticas extrusivas e incidencia de capas depositadas en ambiente marino con estructura de pillow lavas. Además, tiene en su composición algunos sectores con aglomerado y toba volcánica. Son capas pertenecientes al Cretácico Superior, con unos 93 millones de años de antigüedad aproximadamente, y está entre las capas geológicas más antiguas de la República de Panamá, siendo originalmente parte del lecho marino que constituye el basamento de las otras formaciones más jóvenes en el país.

Con respecto a tectónica, en el área de estudio las tectolineales tienen direcciones principales noroeste-sureste y noreste-suroeste. También en la zona costera, a unos 3 km tierra adentro del distrito de Las Tablas, hay presencia de una falla menor con dirección noroeste-sureste y que es paralela a la falla mayor denominada Falla de Azuero, que se localiza en el Golfo de Panamá, a una distancia de 10 km de la costa este de la Península de Azuero (DGRM, 1991). Además de estos fracturamientos regionales y locales, existen otros de menor dimensión, y que crean una extensa red de fallamientos, diaclasas y fisuras, estructuras relevantes desde el punto de vista hidrogeológico, ya que permiten almacenar y circular por sus juntas las aguas subterráneas.

En lo que se refiere a la hidrogeología, según el Mapa Hidrogeológico de Panamá (ETESA, 1999), a nivel nacional hay presencia de tres principales grupos de acuíferos, subdivididos luego en diez unidades hidrogeológicas de aguas subterráneas, descritos a continuación:

- Grupo A: Acuíferos predominantemente intergranulares, continuos, generalmente no consolidados.
- Grupo B: Acuíferos predominantemente fisurados, discontinuos.
- Grupo C: Áreas con acuíferos locales, intergranulares o fisurados, de productividad limitada o poco significativa.

De estos tres grupos, en la zona costera del distrito de Las Tablas están presentes solamente Grupos B y C, constituidos por dos tipos de acuíferos (B-1 y C-3), la determinación y localización de los cuales se basa en las características físicas de las rocas de diferentes formaciones existentes en el área de estudio (Figura 5).

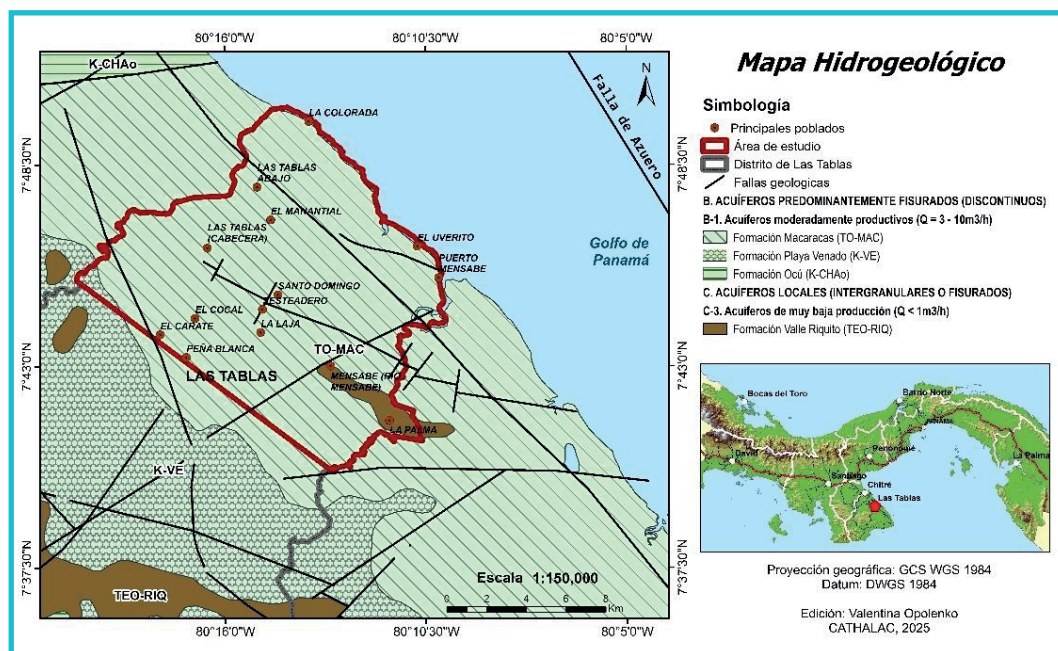
- *Grupo B. Acuíferos predominantemente fisurados (discontinuos)*

Acuífero B-1. Permeabilidad variable y una moderada producción ($Q=3-10 \text{ m}^3/\text{h}=13-44 \text{ gpm}$), que se caracteriza por establecer acuíferos locales, restringidos a zonas fracturadas. Está constituido por la formación sedimentaria Macaracas (TO-MAC) y la formación volcánica Playa Venado (K-VE).

- *Grupo C. Áreas con acuíferos locales (intergranulares o fisurados) de productividad limitada o poco significativa.*

Acuífero C-3. Característico de las áreas con acuíferos locales (intergranulares o fisurados), con permeabilidad baja a muy baja y de productividad limitada o poco significativa ($Q < 1 \text{ m}^3/\text{h} < 4 \text{ gpm}$). Este tipo de acuífero está representado por la formación plutónica Valle Riquito (TEO-RIQ). La ocurrencia de aguas subterráneas está limitada a la zona de meteorización o fracturación de rocas adyacentes.

Figura 5. Mapa hidrogeológico del área de estudio



Fuente: Elaboración propia a partir de ETESA, 1999.

2. CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE ACUÍFEROS COSTEROS

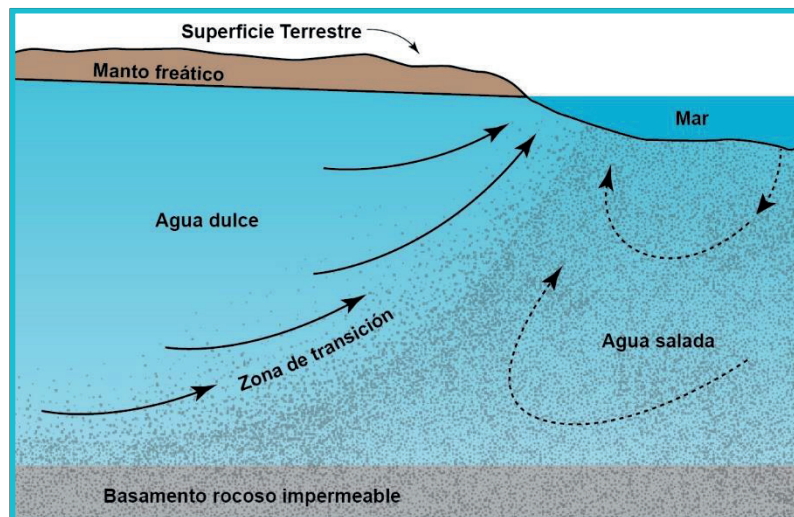
2.1 La intrusión marina: aproximación conceptual e hidrodinámica

La intrusión marina en los acuíferos costeros, es un fenómeno natural (o inducido), en el cual la cuña de agua salina penetra tierra adentro por debajo de la capa de agua fresca dulce (Custodio, 2017). Generalmente, la intrusión marina es un fenómeno complejo a escala de detalle, con cambios rápidos en tres dimensiones, muy afectada por las heterogeneidades y la anisotropía y con gran importancia de los flujos preferenciales, en el cual influyen la porosidad de las rocas y los suelos en la costa; el espesor de la capa de agua dulce; las mareas;

y la extracción de agua mediante pozos, entre otros. Como indica el autor citado, el término intrusión marina o salina, tiene dos interpretaciones habituales. La interpretación estática es la simple constatación de la existencia de la cuña salina tierra adentro, que puede ser natural o por algunas causas antrópicas. Entretanto, la interpretación dinámica hace referencia a una creciente penetración (movimiento) de la cuña salina a lo largo del tiempo, principalmente por causas antrópicas como la extracción de aguas subterráneas cerca de la costa.

Además, como menciona Barlow (2003), las zonas de agua dulce y salada dentro de los acuíferos costeros están separadas por una zona de transición o dispersión, dentro de la cual hay mezcla entre agua dulce y salada, con elevada concentración de cloruro del agua subterránea, que varía de unos 250 a 19,000 mg/L. En la Figura 6 se observa cómo se induce una circulación de agua salada desde el mar hacia la zona de transición y luego de regreso al mar mediante la mezcla de agua dulce y salada en la zona de transición.

Figura 6. Patrones de flujo de agua subterránea y zona de transición de agua dulce a agua salada en un acuífero costero idealizado.



Fuente: Modificado de Barlow, 2003.

La mezcla por dispersión, citando al mismo autor, es causada por variaciones espaciales (heterogeneidades) en la estructura geológica, las propiedades hidráulicas de un acuífero y por fuerzas dinámicas que operan en un rango de escalas de tiempo, incluyendo fluctuaciones diarias en los niveles de marea, variaciones estacionales y anuales en las tasas de recarga de agua subterránea y cambios a largo plazo en la posición del nivel del mar.

Los primeros estudios matemáticos de la posición de la cuña de agua salada en ausencia de mezcla en zonas costeras fueron realizados por Ghyben (1889) y Herzberg (1901), en el cual se considera que existe el equilibrio estático entre columnas de agua de diferente densidad. Hipotéticamente, se asume que no hay flujo de agua salada, que el flujo del agua dulce es

perfectamente horizontal en un acuífero homogéneo e isótropo y la interfase es un plano, sin la zona de mezcla (Custodio y Llamas, 1976). En estas condiciones, en un punto cualquiera A (Figura 7) de la interfase, debe equilibrarse la presión del agua dulce y del agua salada, respondiendo a las siguientes ecuaciones (1) y (2):

$$(h + z) * \gamma_d = z * \gamma_s \quad (1)$$

Donde:

h = cota sobre el nivel del mar del agua dulce en la vertical del punto A, (m)

z = profundidad bajo el nivel del mar del punto A, (m)

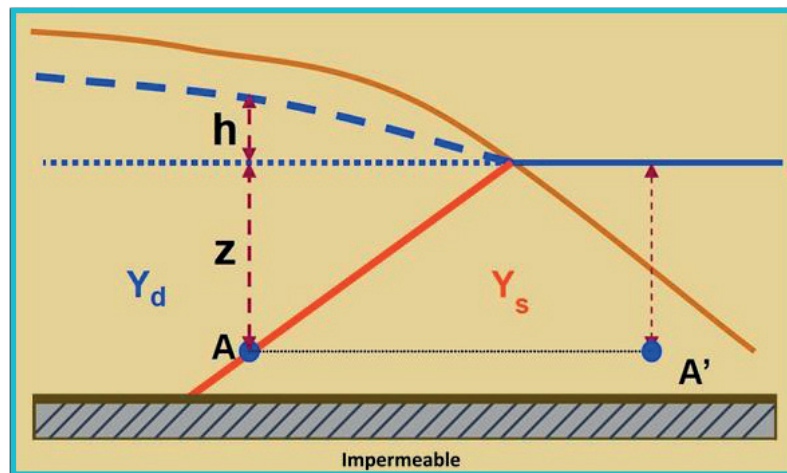
γ_d = peso específico del agua dulce = 1.000 g/cm³

γ_s = peso específico promedio del agua salada = 1.025 g/cm³

$$z = \left(\frac{\gamma_d}{\gamma_s - \gamma_d} \right) * h = \frac{h}{\beta} \quad \text{donde} \quad \frac{1}{\beta} = \left(\frac{\gamma_d}{\gamma_s - \gamma_d} \right) \quad (2)$$

Si $\gamma_d = 1.000 \text{ g/cm}^3$ y $\gamma_s = 1.025 \text{ g/cm}^3 \Rightarrow 1/\beta = 40 \Rightarrow z = 40 h$

Figura 7. Equilibrio del agua dulce y el agua marina en una zona costera.



Fuente: Modificado de IGME, 2009.

Aunque la diferencia entre la densidad del agua dulce y la del agua de mar es pequeña, este contraste de densidad da como resultado, teóricamente, 40 metros de agua dulce por debajo del nivel del mar por cada metro de agua dulce por encima del nivel del mar (Barlow, 2003). Pero esta fórmula (2) conlleva un error elevado justo en la línea de costa, dado que en esta zona el flujo del agua dulce tiene una componente vertical importante. Por tanto, es más exacta a medida que se aleja de la costa. Para poder establecer la relación agua dulce-agua salada en acuíferos costeros y realizar los cálculos de la posición de la interfase en acuífero libre, considerando que no existe una zona de mezcla, se utiliza la fórmula de Glover (Custodio y Llamas, 1976). La fórmula es aplicada a acuíferos libres con pequeño gradiente piezométrico y con perfil del terreno suave en la zona costera.

$$z^2 - \frac{2q_0x}{\beta k} - \frac{q_0^2}{k^2\beta^2} = 0 \quad (3)$$

Donde:

x = distancia a la costa, (m)

z = profundidad de la interfase bajo el nivel del mar, (m)

q_0 = caudal de agua dulce por unidad de longitud de costa, (m³/día/m)

k = conductividad hidráulica, (m/día)

$$\beta = \frac{\gamma_d - \gamma_s}{\gamma_s} = \frac{1}{40} = 0.025$$

γ_d = peso específico del agua dulce = 1.000 g/cm³

γ_s = peso específico promedio del agua salada = 1.025 g/cm³

La explotación de un acuífero costero, supone alteraciones importantes de las condiciones de flujo, que dependen de distintos factores, como el tipo de acuífero, tamaño, sus parámetros hidráulicos, la recarga de acuíferos y las extracciones (bombeos), que afectan las relaciones entre el agua dulce y el agua salada (IGME, 2009). Como consecuencia de lo anterior, los estudios hidrogeoquímicos de las relaciones agua dulce-agua salada, tienen gran importancia para caracterizar la intrusión marina y obtener la situación en un momento dado y también como ha ido evolucionando (Custodio y Llamas, 1976). Las relaciones agua dulce-agua salada en acuíferos costeros están muy influenciadas por los cambios en las condiciones que controlan la dinámica del acuífero, tales como las variaciones del nivel del mar y del nivel piezométrico del agua dulce (González et al, 2013). Por lo tanto, sin una buena comprensión de los procesos asociados, no es posible interpretar correctamente las heterogeneidades de detalle que afectan en gran manera a las relaciones agua dulce-agua salada, pues a las dificultades habituales para un estudio del movimiento del agua subterránea, se suma la existencia de aguas de diferentes densidades debido a que el agua dulce y el agua salada son totalmente miscibles y originan mezclas que aumentan la dificultad de estudio de la dinámica de la intrusión salina (Custodio, 2017).

2.2 Vulnerabilidad de acuíferos a la intrusión marina: Método GALDIT

Para la evaluación de la vulnerabilidad de los acuíferos en zona costera a la intrusión marina del distrito de Las Tablas, se tomó en consideración el método GALDIT, desarrollado por Chachadi y Lobo Ferreira (2001). Es un método de superposición de capas e índices, ampliamente utilizado (Yang et al., 2022, Abishek et al., 2024), que integra la información de seis parámetros hidrogeológicos y topográficos que, en gran medida, gobiernan la susceptibilidad intrínseca de un acuífero costero a la intrusión marina: la presencia de agua subterránea o tipo del acuífero (G), la conductividad hidráulica del acuífero (A), la altura del nivel del agua subterránea sobre el nivel del mar (L), la distancia desde la costa (D), el impacto del estado actual de la intrusión marina (I) y el espesor del acuífero (T). Al diagnosticar la vulnerabilidad del acuífero a la intrusión, permite prevenir o reducir los riesgos de

contaminación. El índice de vulnerabilidad GALDIT se calcula con la siguiente ecuación (4):

$$\text{Índice GALDIT} = \frac{\sum_{i=1}^6 W_i * R_i}{\sum_{i=1}^6 W_i} \quad (4)$$

Donde:

R_i =Factor de valoración o calificación de importancia del i-ésimo indicador.

W_i =Factor de ponderación o el peso del i-ésimo indicador.

A cada variable se le da un valor, que tiene el rango de 2.5 a 10 y la ponderación, que está en el rango entre 1 a 4, siendo el valor 1 de menor importancia y el valor 4 de mayor importancia de la intrusión marina (Tabla 2).

Tabla 2. Puntuación y pesos asignados a los parámetros del Índice GALDIT

Parámetro o indicador	Rango de variables de factores modificados	Factor de valoración (R)	Factor de peso (W)
G: Tipo de acuífero	Acuífero confinado	10	1
	Acuífero no confinado (libre)	7.5	
	Acuífero semiconfinado	5	
	Acuífero limitado	2.5	
A: Conductividad hidráulica del acuífero (m/día)	>40	10	3
	10 – 40	7.5	
	5 – 10	5	
	<5	2.5	
L: Altura del nivel del agua subterránea sobre el nivel del mar (m)	<1	10	4
	1.0 – 1.5	7.5	
	1.5 – 2.0	5	
	>2.0	2.5	
D: Distancia desde la costa (m)	<500	10	4
	500–750	7.5	
	750–1000	5	
	>1000	2.5	
I: Impacto del estado actual de la intrusión de agua de mar EC (µS/cm)	>3000	10	1
	2000–3000	7.5	
	1000–2000	5	
	<1000	2.5	
T: Espesor del acuífero (m)	>10	10	2
	7.5–10	7.5	
	5–7.5	5	
	<5	2.5	

Fuente: Adaptado de Chachadi y Lobo Ferreira, 2005

Una vez calculado el índice GALDIT, que permite determinar un valor numérico para cualquier entorno hidro-geográfico, es posible en función de la magnitud de este índice, clasificar las zonas costeras en varias categorías de vulnerabilidad a la intrusión marina. El rango de

puntuaciones mínimas y máximas del índice GALDIT, que varía entre 2.5 y 10, se divide en tres grupos. Cuanto menor es el índice, menos vulnerable es la zona costera a la intrusión marina. De esta manera, el método permite clasificar la vulnerabilidad de los acuíferos costeros a la intrusión marina en tres grupos de rangos: Alta, Mediana o Moderada y Baja (Tabla 3).

Tabla 3. Clases de vulnerabilidad GALDIT

Rango del índice de vulnerabilidad GALDIT	Clasificación de la vulnerabilidad
≥ 7.5	Alta vulnerabilidad
5 a 7.5	Mediana vulnerabilidad
< 5	Baja vulnerabilidad



Fuente: Chachadi y Lobo Ferreira, 2005.

3. ACUÍFERO COSTERO DEL DISTRITO DE LAS TABLAS

3.1 Marco metodológico

Con el fin de alcanzar los objetivos planteados en esta investigación, se realizaron varios estudios técnicos. Concretamente, se realizó el reconocimiento físico del área, descripción y caracterización geológica e hidrogeológica de la zona costera del distrito de Las Tablas. También se realizó el muestreo y análisis de los distintos parámetros químicos del agua de 77 pozos, cuyos valores permitieron construir el Mapa de conductividad eléctrica (CE) del agua subterránea del área de estudio (Figura 8).

Figura 8. Labores de muestreo y análisis de la calidad química del agua subterránea.



Los muestreos, con fines de comparación de los parámetros, se realizaron en dos períodos climáticos, uno en marzo de 2024, durante la estación seca en ausencia de lluvias y otro, en junio de 2024, durante la estación lluviosa. Los datos obtenidos fueron necesarios para establecer la posición de la cuña salobre y niveles de su afectación en los ecosistemas de áreas costeras evaluadas. Los estudios técnicos realizados fueron los siguientes: exploración geológica, geofísica y el estudio hidrogeológico.

Con el propósito de detectar las condiciones de disposición espacial de las capas litológicas en el área de estudio, así como para comprender las condiciones hidrogeológicas, se realizó la prospección geofísica, implementando el método electroresistivo con arreglo de electrodos tipo Schlumberger, que consiste de cuatro electrodos plantados en la superficie de la tierra, alineados y simétricos con respecto al centro de medición elegido, de los cuales dos exteriores funcionan como fuentes de corriente (A, B) y dos interiores, funcionan como puntos de medición de la diferencia del potencial (M, N). Al aumentar progresivamente la distancia entre electrodos de corriente (AB), manteniendo fijo el centro y el eje de mediciones, se puede tener un registro de las capas geoelectricas atravesadas, midiendo el potencial resultante (ΔU) entre los electrodos de corriente con los electrodos (MN). Al incrementar en forma escalonada la separación de los electrodos de corriente y de potencial, se consigue que la corriente inyectada (I) atraviese los estratos del subsuelo cada vez a mayor profundidad, lo que permite relacionar la composición geológica de las capas para caracterizarlas (Figura 9).

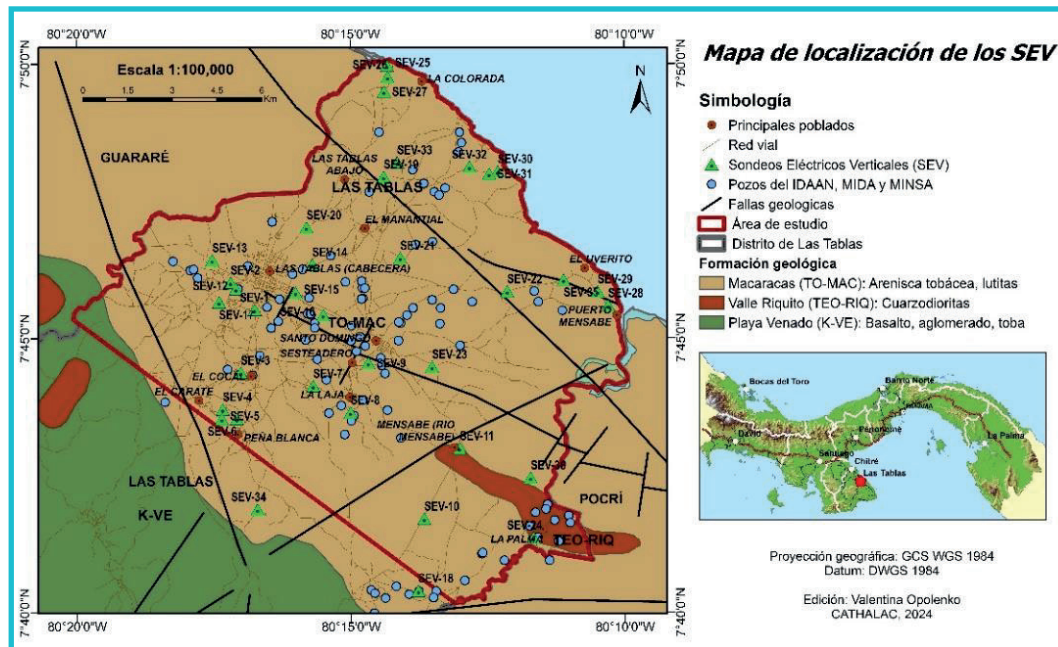
Figura 9. Prospección geofísica en zonas rurales y urbanas del distrito de Las Tablas.



La apertura máxima de electrodos, aplicada en el área de estudio, fue de AB/2 de 100 metros y de MN/2 de 20 metros. La resistividad aparente de los materiales que componen el subsuelo hasta una determinada profundidad, se calcula a través de coeficientes propios de cada arreglo de electrodos con el uso de software W-GeoSoft/WinSev 6.4. Fueron ejecutados en total 36 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), la mayoría de los cuales, 22 SEV (62%), están situados junto a las perforaciones existentes, lo que permitió calibrar el corte geoelectrico

con el litológico, así como delimitar la geometría del acuífero, formando una imagen tridimensional del bloque modelo litológico que constituye el área del estudio. La distribución de los puntos de cateo fue establecida directo en campo durante la ejecución de los trabajos, en función de las incidencias del terreno y su accesibilidad (Figura 10).

Figura 10. Localización de los SEV en el área del proyecto.



El estudio hidrogeológico realizado como parte de todas las actividades, tuvo por objetivo disponer de un conocimiento adecuado y completo del acuífero costero del distrito de Las Tablas, lo que fue posible también con la aplicación de las herramientas hidrodinámicas e hidroquímicas. Comprendió el registro de los niveles freáticos en pozos existentes en el área de estudio, pertenecientes a las distintas instituciones, gestoras del recurso hídrico, como el IDAAN, MIDA, MINSA y el sector privado. De esta manera, al contar con los datos de muestreos, se podrá elaborar distintos mapas temáticos, que caracterizarían el comportamiento del acuífero del área de estudio.

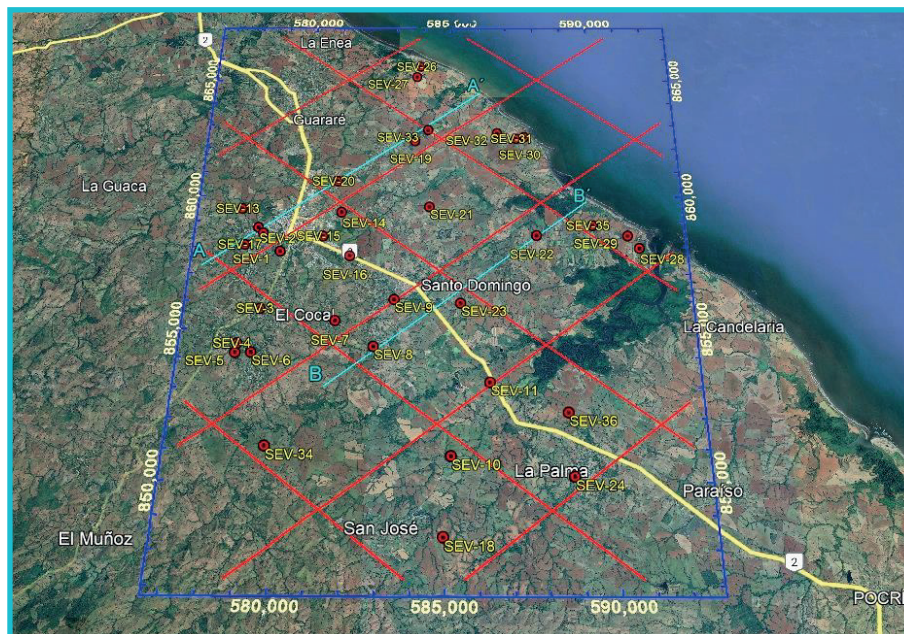
3.2 Resultados de la exploración geológica y geofísica

El análisis e interpretación de los patrones de resistividad eléctrica revelaron que la secuencia estratigráfica del subsuelo consta de cinco capas geoelectricas, lo que permitió la caracterización de las principales formaciones geológicas del área de estudio (Tabla 4). Basándose en la interpretación litológica de capas geoelectricas, aplicando el software RockWorks, se elaboró un bloque modelo tridimensional del área de estudio que representa tipos de estas litologías interpolados y, además, se realizaron 10 cortes o diagrama de cercas del modelo generado, de orientación paralela a la costa y a 90° hacia la misma (Figura 11).

Tabla 4. Interpretación de la resistividad eléctrica de los SEV del área de estudio

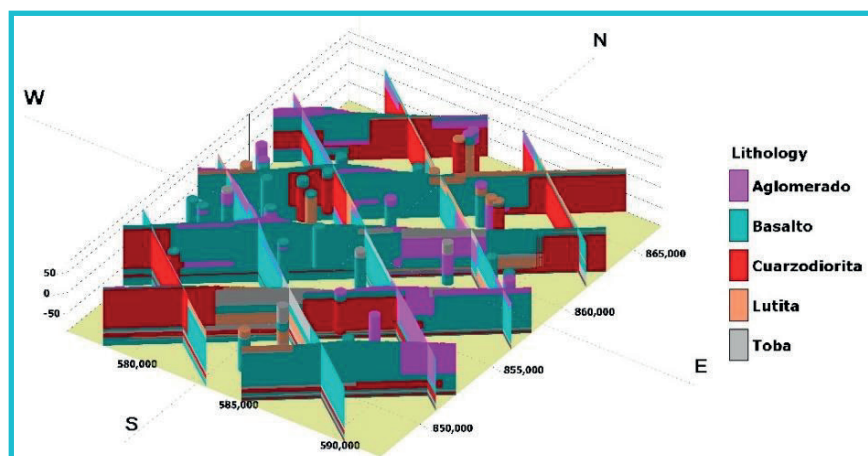
Capas	Rangos de resistividad, Ohm-m	Litología	Formación geológica
1	5 - 10	Lutita	Macaracas (TO-MAC)
2	1,000 - 3,000	Cuarzodiorita	Valle Riquito (TEO-RIQ)
3	70 - 350	Basalto	Playa Venado (K-VE)
4	30 - 200	Aglomerado	
5	15 - 35	Toba	

Figura 11. Secciones de cortes del bloque modelo litológico y de perfiles A-A' y B-B'.



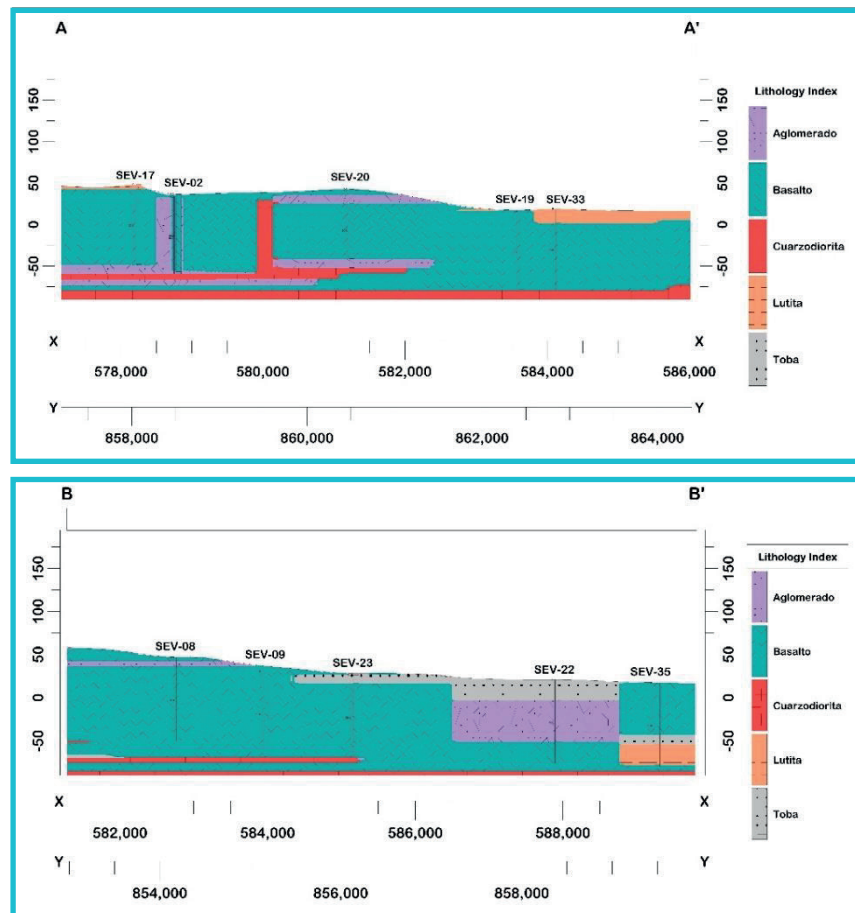
Con la generación de este modelo litológico fue posible cuantificar los volúmenes de los distintos materiales que componen el reservorio subterráneo de la zona costera del distrito de Las Tablas, así como también definir su posición espacial dentro del mismo (Figura 12).

Figura 12. Diagrama de cercas del bloque modelo del acuífero costero del área de estudio.



Para validación de la información obtenida con la exploración geoelectrica, se realizaron dos cortes litológicos perpendiculares a la costa A-A' y B-B' (Figura 13). Ambos perfiles confirmaron la posición del muro o de la base del acuífero, que está a unos -75 m bajo el nivel del mar. Además, se identificó la falla geológica menor, que va paralela a la costa a unos 3 kilómetros tierra adentro. Concretamente, se observa un desplazamiento de bloques en la sección B-B', entre los SEV-22 y SEV-35.

Figura 13. Cortes litológicos A-A' y B-B' del área de investigación.



El resultado final de la exploración geológica y geofísica realizada, permitió visualizar el medio acuífero, tanto en el plano vertical como en el horizontal de la zona costera del distrito de Las Tablas. Desde el punto de vista hidrogeológico, es conveniente hacer una breve reseña de las disposiciones de las tres capas litológicas más relevantes y su papel en el funcionamiento del acuífero costero: cuarzodiorita, lavas basálticas y aglomerado, así como también de otras dos capas presentes, toba y lutita.

3.3 Características hidrogeológicas

Para comprender las condiciones hidrogeológicas predominantes y determinar el potencial, así como afectación de agua subterránea por la intrusión marina en la zona costera del distrito

de Las Tablas, fueron interpretadas las cinco capas geoelectricas del subsuelo, detectadas por la exploración geofísica, con distintos rangos de resistividad y espesor.

Lavas basálticas: Son el elemento de mayor relevancia acuífera, debido a que es el material es más abundante en el espesor saturado de estas reservas de agua. En primera instancia, sus condiciones de formación con características de rápido enfriamiento en ambiente marino. Están más diaclasadas y contienen estructuras como las pillow lavas, formando vesículas de material, dándole mayor porosidad. El otro elemento que aumenta la capacidad acuífera al basalto de esta formación Playa Venado, es que posterior a su constitución y enfriamiento, se dio un fenómeno de intrusión de cuarzodioritas de la formación Valle Riquito, con levantamiento de material, lo que causó un agrietamiento adicional a estas coladas de basalto.

Aglomerado: En general, representa un medio acuífero moderado de permeabilidad secundaria, es decir, que el agua contenida en este material es producto de discontinuidades interconectadas, tales como fallas, grietas, fisuras y diaclasas, que permiten a nivel macro tener un flujo de agua homogéneo. La disposición espacial de esta capa litológica en el modelo generado, asociada con el basalto, es totalmente coherente con su génesis más común.

Cuarzodiorita: Constituye la base impermeable del área de estudio, la que da forma a la zona acuífera, pues se trata de la roca intrusiva perteneciente a la formación Valle Riquito.

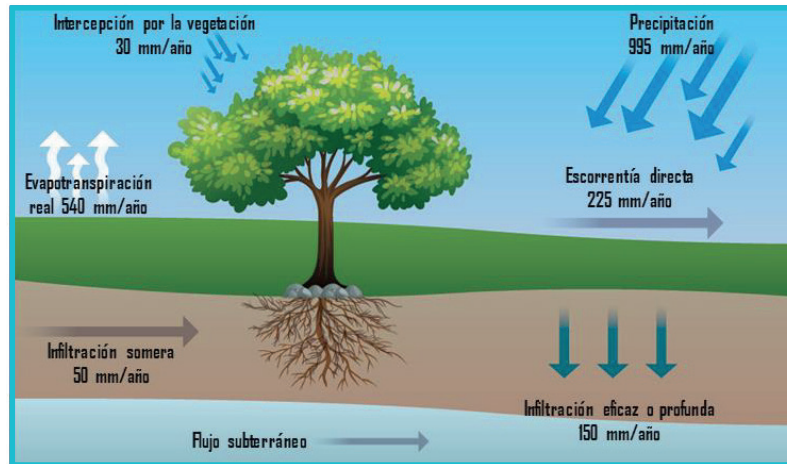
Toba. Este material, representado por ceniza volcánica con diferentes grados de consolidación y dureza. Como medio acuífero se caracteriza por tener muy baja permeabilidad, lo que conduce en general a los pozos con rendimiento muy limitado o nulo.

Lutita. Siendo una roca sedimentaria de grano muy fino, integrada por detritos clásticos constituidos por partículas de la arcilla y del limo, se considera como un material prácticamente impermeable, debido a que sus poros son muy pequeños y no están bien comunicados entre ellos.

Del análisis de estas cinco capas ya descritas, se pudo inferir que el acuífero costero está representado por dos capas más productivas, tales como aglomerado y basalto. Mientras tanto, la capa de cuarzodiorita impermeable sirve de muro o base del acuífero, y otras dos capas (tobas y lutitas), tienen muy poca relevancia en este sistema acuífero.

Para la evaluación del flujo de las aguas subterráneas en el área de estudio, se realizó el balance hídrico del acuífero, estimando su recarga media (infiltración profunda) en 150 mm/año, lo que equivale a un volumen de 27 hm³/año (Figura 14). Se determinó que el acuífero es explotado por numerosos pozos de poca profundidad (entre 30 y 80 metros), con una productividad de unos 150–200 m³/día, cuyas aguas se utilizan para suplir las diversas demandas, tales como para el consumo doméstico, industrial y agrícola, entre otros. Se consideró al sector agrícola como mayor usuario de agua subterránea por las características propias de la actividad, especialmente durante la temporada seca de diciembre a abril.

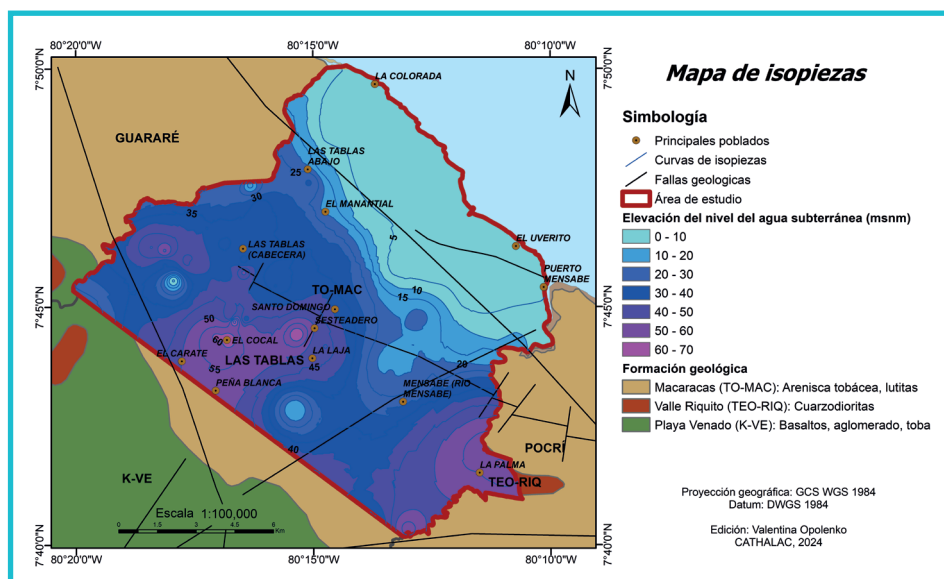
Figura 14. Balance hidrológico del área de proyecto.



Se estimó que el volumen promedio anual de extracción del agua subterránea para consumo humano, industrial y otros usos, fue de 4 hm³/año. Entretanto, el uso de agua para actividades agrícolas estuvo por el orden de 16 hm³/año. Como resultado, el total de estos volúmenes de extracción ha sido de 20 hm³/año, lo que representa el 74% de la recarga anual del acuífero, la cual representa un 27 hm³/año. A pesar de tener el balance hidrológico positivo, esto da una alerta temprana, ya que el mismo se encuentra, según la clasificación de la FAO (2021), en el rango “Medio” (50% – 75%) del nivel de estrés hídrico, pero muy próximo a pasar al rango de estrés “Alto” (75% – 100%).

Durante la realización del estudio hidrogeológico, fueron monitoreados los pozos existentes, y a partir de los niveles freáticos determinados en la red de muestreo, se elaboró el mapa de isopiezas, que se utilizó para establecer el gradiente hidráulico y la dirección de flujo del sistema acuífero local (Figura 15).

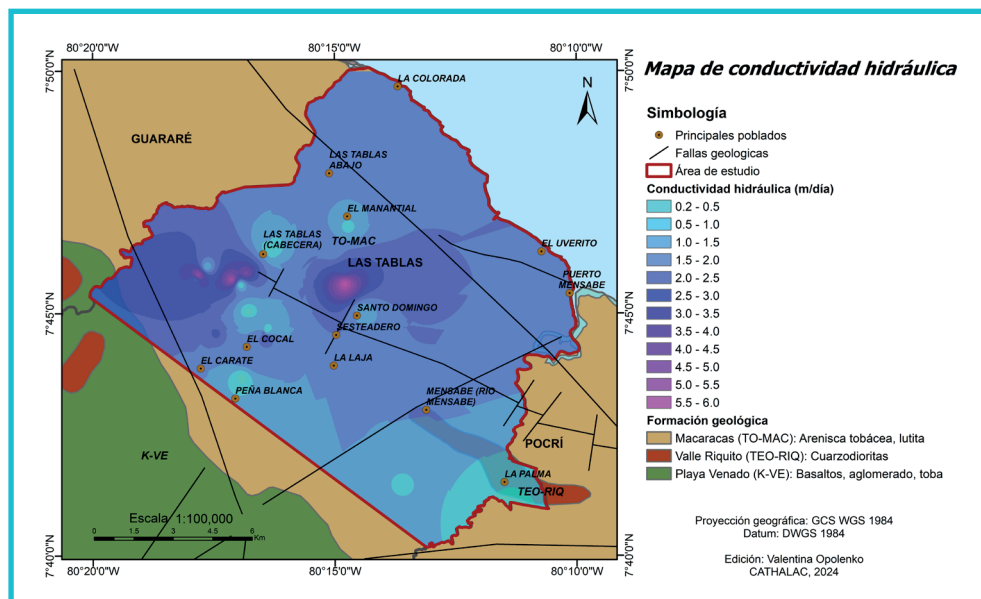
Figura 15. Mapa de isopiezas del área de estudio.



En la zona suroeste del área de estudio se observan los mayores valores de elevación del nivel del agua subterránea con más de 60 msnm, mientras que hacia el noreste el nivel freático descende progresivamente. No obstante, en la parte sureste se observan algunos conos de depresión causados por bombeos intensos de los pozos que abastecen a las comunidades para sus distintos usos. Además, se observa una franja costera de unos 3 km de anchura con valores del nivel freáticos menores de 5 msnm. Acorde con estas características, una gran parte del territorio evaluado se define como zona de descarga de acuíferos, con la dirección del flujo noreste hacia el mar y un gradiente hidráulico de $i = 0.56\%$.

Entretanto, los datos de pruebas de bombeo evaluadas, permitieron definir el parámetro de la conductividad hidráulica (k) del acuífero costero, y se obtuvo como resultado, en gran parte los valores de $k = 1.5 - 2.0$ m/día (Figura 16). Estos valores son coherentes con la permeabilidad de aglomerados y basaltos fracturados con permeabilidad secundaria limitada (Custodio y Llamas, 1983). Por lo tanto, se pudo clasificar al acuífero evaluado como un “acuífero pobre”, concordando con el Mapa Hidrogeológico de Panamá.

Figura 16. Mapa de conductividad hidráulica del área de estudio.



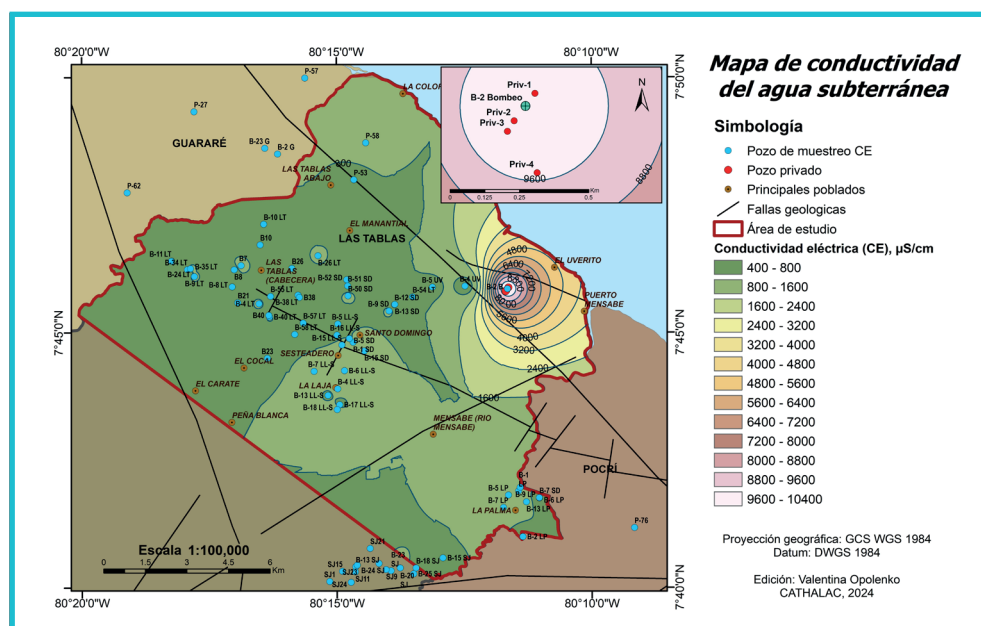
Para determinar el posible riesgo de contaminación del acuífero costero por la intrusión marina en el área de estudio, se realizaron los muestreos de agua y mediciones in situ de los 77 pozos, que integran la red de abastecimiento de agua para el consumo humano, manejada por el Instituto de Acueductos y Alcantarillados (IDAAN) y para otros usos (Figura 17).

Figura 17. Monitoreo de caudales y respuesta hidráulica de pozos existentes.



El parámetro que aportó la información relevante y/o evidencia de la salinización del acuífero, fue la conductividad eléctrica del agua. La evaluación de este parámetro mostró en la mayoría de los pozos, los valores de conductividad entre 400 y 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$, que se encuentran dentro del rango establecido por la normativa nacional vigente sobre la calidad del agua para el consumo humano, cuyo límite máximo permitido es de 850 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Reglamento Técnico DGNTI-COPANIT 21-2019). Sin embargo, algunos de los pozos muestreados, principalmente en las comunidades de San José, Santo Domingo y La Palma, a pesar de estar localizados a una distancia considerable de 8-10 km de la línea de la costa, registraron valores de conductividad del agua por encima del límite máximo permitido (850-1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$), lo que puede explicarse probablemente por la existencia de las intensivas actividades agrícolas, con el riego y fertilización en la zona (Figura 18).

Figura 18. Mapa de conductividad eléctrica (CE) del agua subterránea del área de estudio.



Por otra parte, los datos de la calidad del agua obtenidos durante la realización de la prueba de bombeo en el pozo abandonado No. B-2 Uverito, localizado en el área próxima a la costa, a unos 1.5 km de la comunidad de El Uverito, indican valores de conductividad eléctrica (CE) por encima de los 10,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo que representa un fuerte indicativo de posible contaminación por la intrusión marina en el acuífero costero en la zona.

Con los resultados de este muestreo, se pudo establecer que la presencia de alta conductividad eléctrica del agua subterránea en el sector, que se caracteriza por ser zonas pantanosas salobres, influenciadas por las mareas, con relieve prácticamente plano, típico del ecosistema de manglares, se debe, probablemente, a la explotación de varios pozos privados para el uso agropecuario. Los mismos están localizados a muy poca distancia entre ellos, de unos 50 m o menos y se puede inferir por estos extremadamente elevados valores de conductividad eléctrica del agua, que se explotan con una alta tasa de extracción.

3.4 Cálculo de la profundidad de la interfase en condiciones naturales

Para el cálculo de la relación agua dulce-agua salada, correspondiente a la posición de la interfase en el acuífero costero del distrito de Las Tablas, fue aplicada la fórmula de Glover, citada por Custodio y Llamas (1976). Tomando en consideración que el espesor del acuífero evaluado es de $h=75$ m, la conductividad hidráulica media $k=2$ m/día y el gradiente hidráulico del flujo subterráneo $i=0.56\%$, se determinó el flujo de agua dulce que se descarga al mar por unidad de longitud de costa, siendo $q_0 = k * h * i = 0.84 \text{ m}^3/\text{día}/\text{m}$. También se tomó $1/\beta = 40$. En estas condiciones la profundidad de la interfase agua dulce - agua salada bajo el nivel del mar (z) del acuífero costero del distrito de Las Tablas a una distancia (x) fue la siguiente:

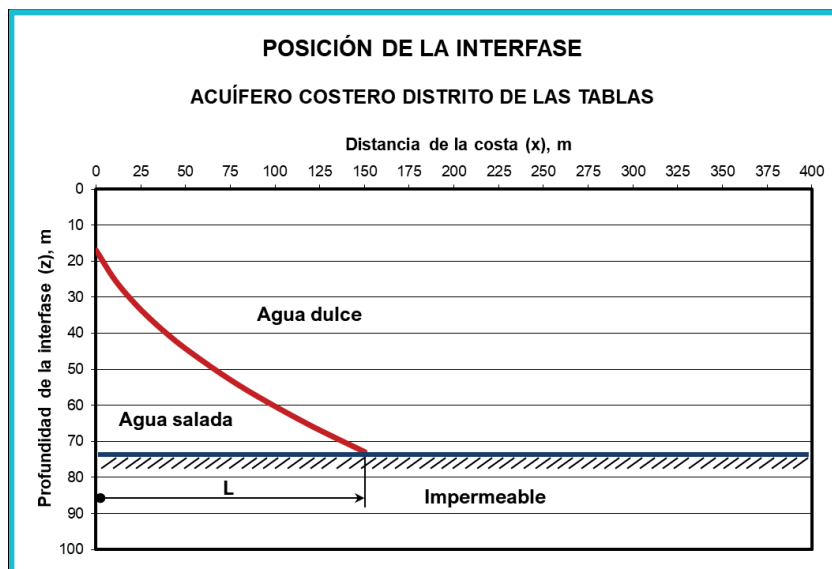
$$z^2 - \frac{2 * 0.84 * 40}{2.0} x - \frac{0.84^2 * 40^2}{2.0^2} = 0$$

Dando como resultado:

$$z^2 = 33.6 x + 282.24$$

Al graficar los valores de la ecuación obtenida para una profundidad máxima de la interfase de -75 m bajo el nivel del mar, donde la cuña de agua salada tocaría la base del acuífero, compuesta por cuarzodiorita de la formación intrusiva Valle Riquito y de conformidad con los perfiles litológicos generados en el marco de esta investigación, se estableció la posición de la interfase de agua dulce-agua salada en condiciones naturales (Figura 19).

Figura 19. Posición de la interfase de agua dulce-agua salada del área de estudio



Como resultado, con el uso de la fórmula de Glover, se pudo estimar la penetración máxima de la cuña de agua salada en condiciones naturales sin explotación del acuífero, que ha sido de $L=150$ metros. No obstante, en la zona de los pozos aledaños a la comunidad costera del Uverito, que se explotan con una alta tasa de extracción, los mismos presentan una elevada conductividad, indicando así que la interfase ha penetrado mucho más profundamente y hay un problema local de intrusión marina.

3.5 Cálculo de la vulnerabilidad de acuíferos a la intrusión marina

Mediante la aplicación del método GALDIT, se llevó a cabo la evaluación de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la intrusión marina en el acuífero costero del distrito de Las Tablas, cuyo resultado final ha sido la construcción del Mapa de Vulnerabilidad de los acuíferos ante la intrusión del agua del mar. Para elaborar estos mapas se utilizó el Sistema de Información Geográfica (SIG). Todos los parámetros GALDIT, según la metodología descrita anteriormente, fueron evaluados, calificados y ponderados, generando las respectivas capas temáticas. La distribución espacial de los parámetros GALDIT se elaboró utilizando la técnica de interpolación de ponderación por distancia inversa (IDW) y/o Kriging, de conformidad con los datos disponibles del área evaluada. En total fueron generados seis mapas temáticos reclasificados según los respectivos factores de valoración, que caracterizan cada parámetro o indicador según la Tabla 2, dando como resultado lo siguiente (Figura 20):

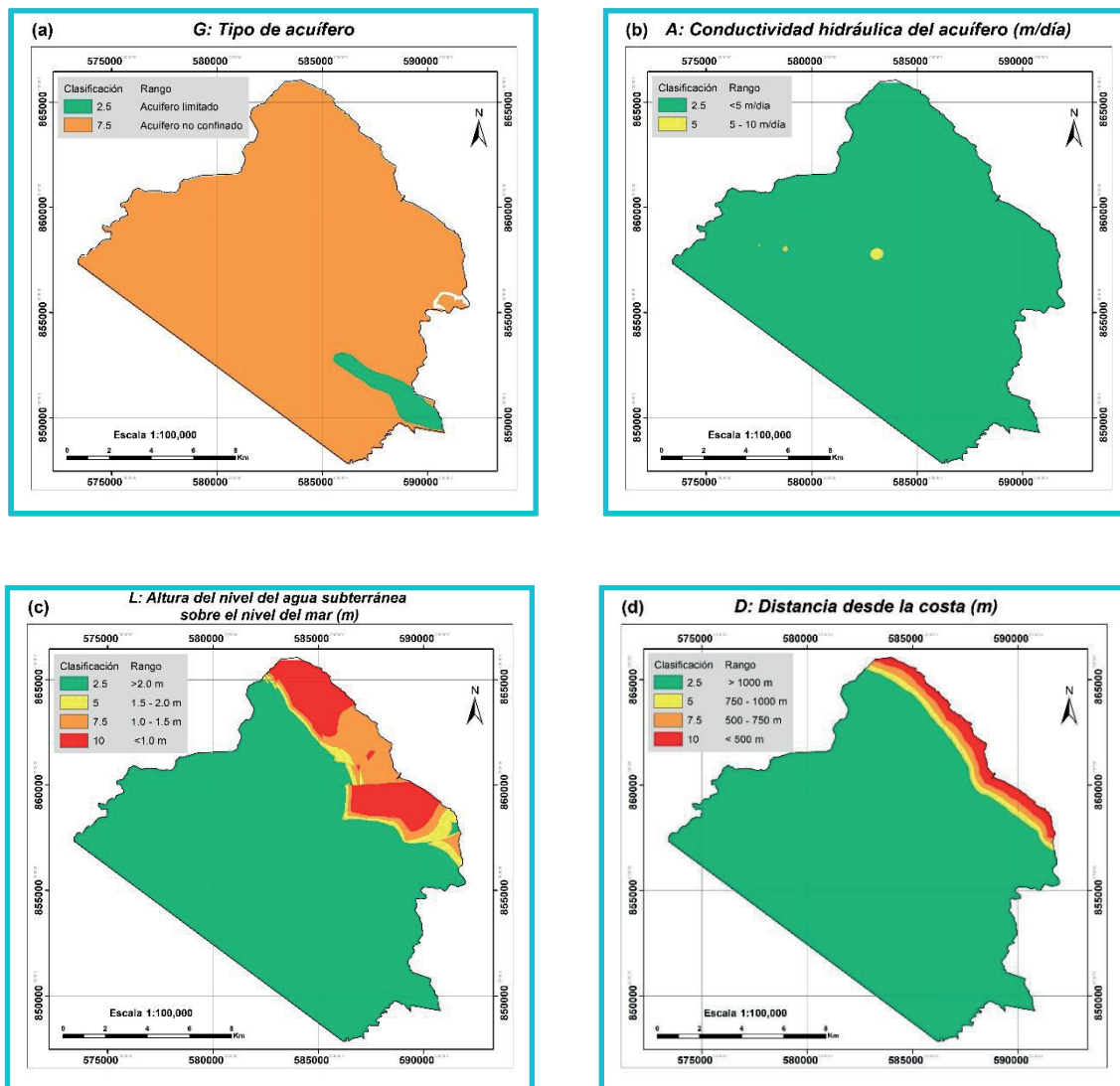
- **G:** Tipo de acuífero (Groundwater occurrence). Un acuífero no confinado será menos vulnerable a la intrusión salina comparado con un acuífero confinado, porque durante el bombeo, el cono de depresión es comúnmente más grande que el de acuífero libre. La presencia de agua subterránea en el área evaluada se caracteriza por estar en gran parte en el sistema acuífero que se encuentra en condiciones no confinadas, por lo que se le

asignó una calificación de 7.5, y una pequeña parte se clasifica como acuífero limitado con valores de clasificación 2.5 (Figura 20-a).

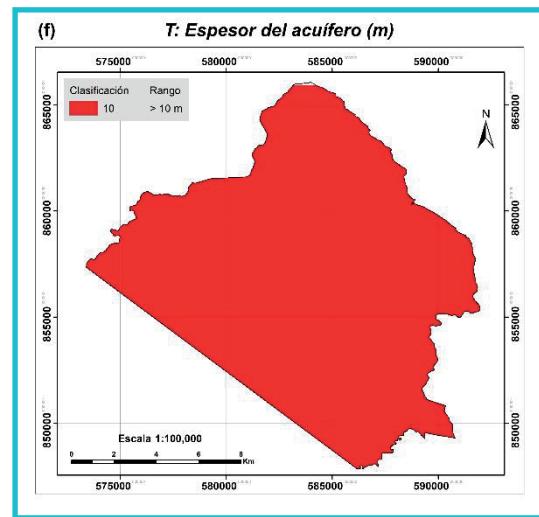
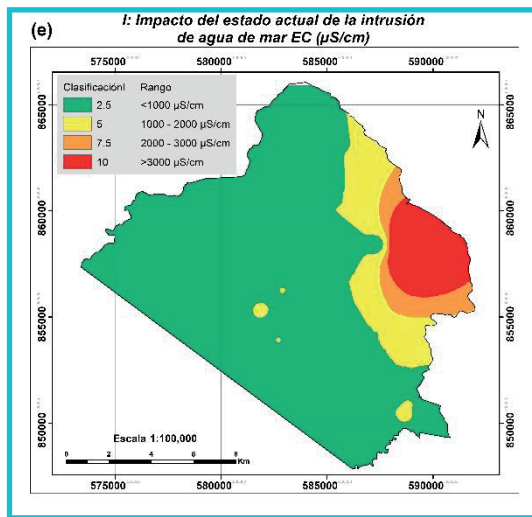
- **A:** Conductividad hidráulica del acuífero (Aquifer hydraulic conductivity). La mayor conductividad hidráulica permite mayor penetración de la cuña salina, lo que implica un aumento en la magnitud del movimiento del frente de agua de mar y, en consecuencia, una mayor vulnerabilidad a la intrusión marina. Para el área de estudio, los valores de conductividad fueron obtenidos de las pruebas de bombeo realizadas, por lo general cuando fueron perforados los pozos. La conductividad hidráulica del área de estudio varía de 0.15 a 5.71 m/día. En casi toda la extensión de la zona estudiada la conductividad hidráulica es menor a 5 m/día, por lo que el valor asignado al parámetro A es de 2.5 (Figura 20-b).
- **L:** Altura del nivel piezométrico sobre el nivel del mar (Height of groundwater level). El nivel piezométrico es muy importante, debido a que, a mayor altura del agua dulce sobre el nivel del mar, la interfase de agua dulce/salada se encontrará a mayor profundidad. Para el área de evaluación, la mayor parte de la superficie se clasifica con el valor de 2.5. El resto del polígono fue clasificado con los valores de 5, 7.5 y 10. El impacto máximo de la intrusión de agua se observa en la proximidad de la costa y disminuye a medida que se avanza hacia el interior de la zona evaluada (Figura 20-c).
- **D:** Distancia a la costa (Distance from the shore). La intrusión salina generalmente disminuye con el incremento de la distancia en dirección perpendicular a la línea de la costa. Por lo tanto, esta distancia tierra adentro y la altura del nivel del agua subterránea (nivel freático) sobre el nivel del mar, son considerados como los factores con mayor influencia en la potencial intrusión marina. Para el caso concreto del área estudiada, la gran parte de la superficie se clasifica con el valor de 2.5 y el resto del polígono obtuvo valores de 5, 7.5 y 10, teniendo los tres últimos la mayor influencia a lo largo de la costa (Figura 20-d).
- **I:** Impacto del estado actual de la intrusión de agua de mar (Impact of existing status of seawater Intrusion). Originalmente este factor utilizó la relación $Cl^-/(HCO_3^{-1} + CO_3^{2-})$, propuesta por Chachadi y Lobo Ferreira (2001). Luego, este factor fue modificado por Dörfliger et al., (2011), que presentaron la conductividad eléctrica del agua subterránea como un indicador alternativo de la salinidad del agua subterránea, cuando no se dispone de datos sobre la química del agua subterránea para la relación cloruro/bicarbonato. En presente estudio se utilizaron los registros de conductividad eléctrica de pozos ubicados en la zona costera del acuífero. Las mediciones permitieron establecer que la mayor parte del polígono evaluado está clasificada con el valor 2.5, lo que representa el rango de conductividad eléctrica del agua de pozos (EC) menor de 1000 $\mu S/cm$. Mientras tanto, el resto del polígono obtuvo valores de clasificación de 5, 7.5 y 10, teniendo los rangos de 1000 a 2000 $\mu S/cm$, 2000 a 3000 $\mu S/cm$ y mayor de 3000 $\mu S/cm$ (Figura 20-e).
- **T:** Espesor del acuífero (Saturated aquifer thickness). Se considera que a mayor espesor del acuífero la cuña de agua salada tiene una mayor penetración tierra adentro,

especialmente en acuíferos no confinados o libres. En el área de estudio, que prácticamente es representada por el acuífero libre de la formación geológica Macaracas (TO-MAC), ha sido clasificada con el valor de 10, teniendo un rango de espesor del acuífero mayor de 10 metros (Figura 20-f).

Figura 20. Capas de parámetros GALDIT: (a) el tipo del acuífero; (b) conductividad hidráulica del acuífero; (c) altura del nivel del agua subterránea sobre el nivel del mar; (d) distancia desde la costa; (e) impacto del estado actual de la intrusión marina; (f) espesor del acuífero.



De esta manera, mediante el procesamiento en el SIG de los seis parámetros con la herramienta “calculadora ráster”, aplicando las fórmulas (4) y (5), se obtuvo el Índice de Vulnerabilidad GALDIT a la intrusión marina en la zona costera del distrito de Las Tablas.



$$\text{Índice GALDIT} = \frac{G_W * G_R + A_W * A_R + L_W * L_R + D_W * D_R + I_W * I_R + T_W * T_R}{G_W + A_W + L_W + D_W + I_W + T_W} \quad (5)$$

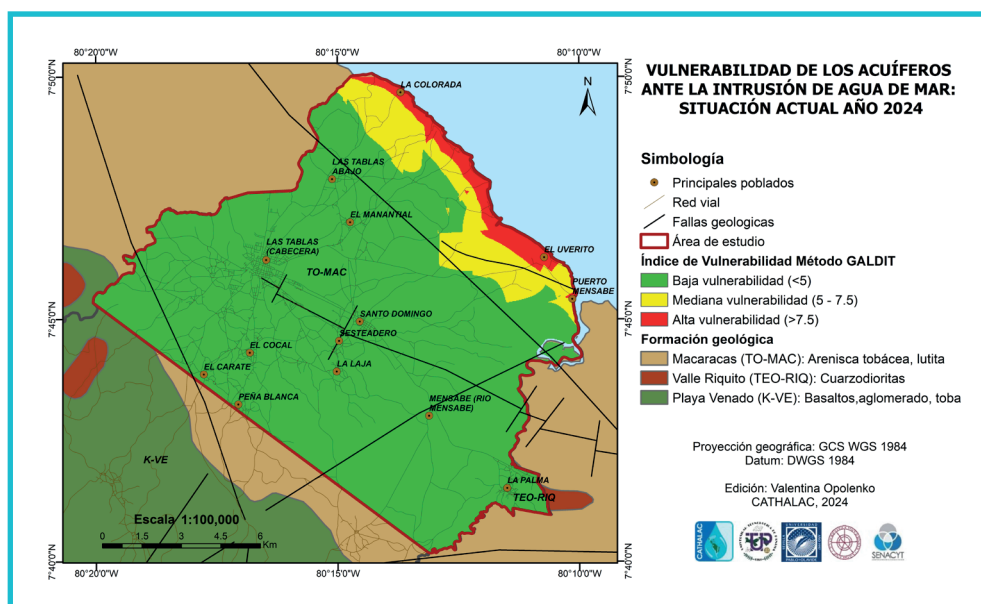
Donde:

R = Factor de valoración o calificación de importancia del indicador.

W = Factor de ponderación o el peso del indicador.

El índice de vulnerabilidad del acuífero a la intrusión marina GALDIT en situación actual, calculado para la zona costera del distrito de Las Tablas, varía en el rango de 3 a 8, dando como resultado en el mapa generado, tres clases de la distribución espacial de este índice de vulnerabilidad (Figura 21): baja (<5), mediana o moderada (5–7.5) y alta (>7.5).

Figura 21. Mapa de vulnerabilidad actual de los acuíferos a la intrusión marina en la zona costera del distrito de Las Tablas.



La *vulnerabilidad baja* cubre la mayor parte del polígono valorado (87.65%), lo que representa 157.77 km². La zona delimitada en el mapa de vulnerabilidad inicia aproximadamente a unos 1500 a 2500 metros de la costa, y se caracteriza por valores relativamente bajos de la conductividad eléctrica del agua subterránea y altos del nivel piezométrico. Esta condición favorable de distribución espacial de vulnerabilidad baja, distinguida con el color verde en el mapa, indica que existe muy limitada la posibilidad de afectación por la intrusión marina tierra adentro, a pesar de un volumen significativo de extracción de agua subterránea por numerosos pozos para distintos usos, que es aproximadamente de 20 hm³/año, lo que representa el 74% de la recarga anual del acuífero.

El 9.11% del área restante (16.39 km²) del polígono valorado, se caracteriza por una *vulnerabilidad moderada*, que, en este caso particular, es una franja irregular de unos 1500 a 2500 metros, paralela a la costa, donde los valores de la conductividad eléctrica del agua subterránea aumentan notablemente, llegando los mismos durante el muestreo de pozos realizado, a unos valores extremos por el orden de 10,000 µS/cm en el sector este del área de estudio, en la zona aledaña a los manglares cercanos al Puerto Mensabé y a la comunidad de Uverito. Con los resultados del muestreo se pudo precisar que la presencia de excesivamente elevada conductividad eléctrica del agua subterránea en esta zona, se debe mayormente a la explotación de pozos privados para el uso agropecuario, localizados a muy poca distancia entre ellos y con una alta tasa de extracción, como se indica en el Mapa de conductividad eléctrica (CE) del agua subterránea del área de estudio (Figura 14). Por otro lado, la posición del nivel freático sobre el nivel del mar, que es un parámetro muy importante en el cálculo de la vulnerabilidad, disminuye debido a esta extracción intensa y la presencia de zonas pantanosas salobres de relieve prácticamente plano, característico del ecosistema de manglares.

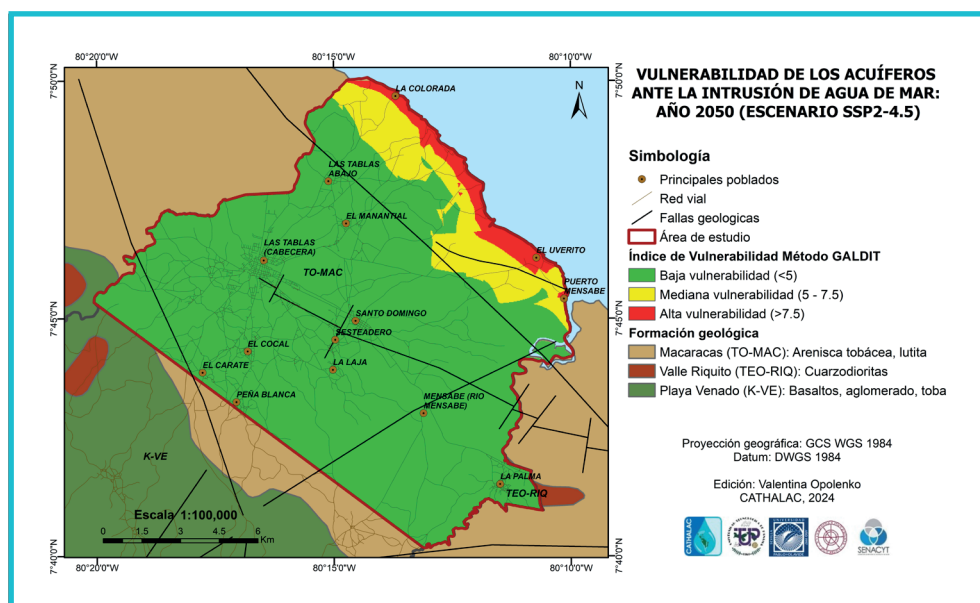
Mientras tanto, la *vulnerabilidad alta* a la intrusión marina, se presenta en forma de una angosta franja paralela a la costa, con un ancho aproximado de 500 metros (3.24% de la superficie) y con una extensión de 5.84 km². Este sector se caracteriza, al igual que el sector con la vulnerabilidad media, por la presencia de manglares en zonas bajas y en las desembocaduras de los ríos, con la intrusión periódica de agua salada del mar durante las mareas.

También fueron elaborados dos mapas de vulnerabilidad con proyecciones a mediano plazo, es decir para el año 2050, de cara a distintos escenarios futuros de cambio climático. Los mapas construidos permiten analizar el efecto del aumento del nivel medio del mar a causa de altas emisiones de CO₂ (WMO, 2024), en los acuíferos de la zona costera evaluada. Según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) en su Sexto Informe de Evaluación del Grupo de Trabajo I, AR6, (IPCC, 2022), se presentan nuevas proyecciones correspondientes a un conjunto de escenarios.

Para la elaboración de estos dos mapas de vulnerabilidad de acuíferos con proyecciones a mediano plazo (2050), de los seis parámetros de GALDIT previamente calculados para la construcción del mapa de la vulnerabilidad actual de los acuíferos, se modificó solamente el parámetro L, tomando en consideración los respectivos ascensos de nivel del mar. Como indica el Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (2023) para el pacífico panameño los ascensos serían para el año 2050 de 0.19 metros para el escenario optimista SSP2-4.5 y de 0.26 metros para el escenario pesimista SSP5-8.5. De esta manera, aplicando los nuevos valores de la altura del nivel del agua subterránea sobre el nivel del mar, fueron construidos los siguientes dos mapas:

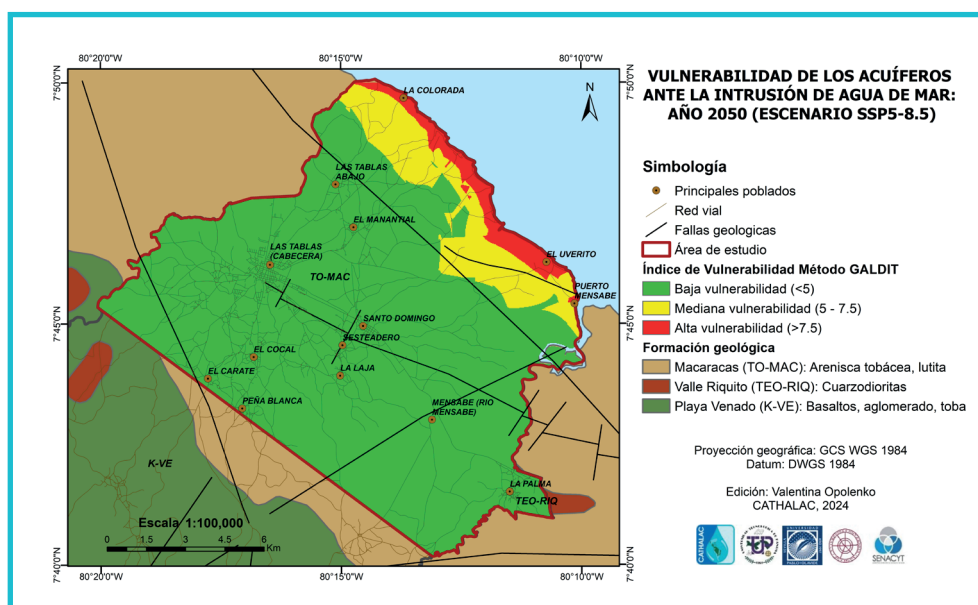
– *Mapa de Vulnerabilidad de los acuíferos ante la intrusión del agua del mar: Año 2050 Escenario SSP2-4.5.* Es un escenario con emisiones de GEI intermedias y emisiones de CO₂ que se mantienen en torno a los niveles actuales hasta mediados de siglo. Se consideró que con ese escenario optimista para el año 2050 se registrará un ascenso de nivel del mar de 0.19 m para la costa del Pacífico de Panamá (Figura 22).

Figura 22. Mapa de Vulnerabilidad de los acuíferos ante la intrusión del agua del mar: Año 2050 Escenario SSP2-4.5.



– *Mapa de Vulnerabilidad de los acuíferos ante la intrusión del agua del mar: Año 2050 Escenario SSP5-8.5.* Es un escenario pesimista con emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) muy altas y emisiones de CO₂ que se duplican aproximadamente sobre los niveles actuales para el año 2050. Se consideró que con ese escenario para el año 2050 se registrará un ascenso de nivel del mar de 0.26 m para la costa del Pacífico de Panamá (Figura 23).

Figura 23. Mapa de Vulnerabilidad de los acuíferos ante la intrusión del agua del mar:
Año 2050 Escenario SSP5-8.5.



Cabe destacar que, comparando ambos mapas generados con las proyecciones a futuro (Figuras 22 y 23) y el mapa de vulnerabilidad actual de los acuíferos a la intrusión marina (Figura 21), se puede observar que realmente no hubo diferencias significativas entre estos tres mapas, con respecto a la distribución espacial de las clases del Índice de vulnerabilidad en la zona costera del distrito de Las Tablas (Tabla 5).

Tabla 5. Clases de vulnerabilidad GALDIT actual y futura del área de investigación

Clases de vulnerabilidad	Nivel actual del mar (m)		Nivel del mar previsto en año 2050 Escenario SSP2-4.5 (+0.19 m)		Nivel del mar previsto en año 2050 Escenario SSP5-8.5 (+0.26 m)	
	Área (km ²)	(%)	Área (km ²)	(%)	Área (km ²)	(%)
Baja	157.77	87.65	155.98	86.66	155.42	86.35
Moderada	16.39	9.11	17.98	9.99	18.35	10.20
Alta	5.84	3.24	6.04	3.35	6.22	3.46

Los resultados obtenidos de la construcción del mapa de vulnerabilidad actual del acuífero costero del distrito de Las Tablas durante la investigación, indican que las medidas de mitigación de este fenómeno de contaminación del agua subterránea dulce por el agua salada, deben ser implementadas lo más pronto posible (a corto plazo), para preservar este rango de la vulnerabilidad baja, la que domina actualmente con porcentajes altos de distribución en el área de estudio. El mismo comportamiento también se observó en los mapas de vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la intrusión marina, elaborados para ambos escenarios del cambio climático a futuro (año 2050), información que permitiría a los gestores de recursos hídricos la planificación de las medidas adecuadas de adaptación a este fenómeno.

CONCLUSIONES

Las consecuencias del aumento del nivel del mar, al invadir el agua salada cada vez más las zonas costeras del país, tienen efectos adversos sobre los recursos hídricos y ocasionarán en un futuro cercano, una mayor dependencia de las aguas subterráneas como mecanismo de protección contra las sequías, dada la creciente incertidumbre respecto de la disponibilidad del agua superficial. A pesar de que el agua subterránea representa la mayor reserva a nivel mundial de agua potable para el futuro, es igualmente vulnerable a la sobreexplotación y contaminación por el aumento de salinidad de mantos acuíferos provocada por la subida del nivel del mar.

Esta situación de inseguridad se refleja en la gestión de los recursos hídricos en Panamá. Durante los últimos años, la excesiva explotación de acuíferos en zonas costeras de la provincia de Los Santos, y en especial del distrito de Las Tablas, pone en riesgo el abastecimiento de amplios sectores de la población, principalmente en épocas de sequía. El agotamiento de este recurso hídrico subterráneo, se debe en gran parte a la concentración demográfica en la región, la creciente actividad turística, la expansión del cultivo de regadío y la presencia de distintos complejos industriales, todo esto unido a una baja pluviometría y el aumento de la temperatura a causa del cambio climático.

Con el fin de evaluar la vulnerabilidad a la contaminación por intrusión marina, se realizó la valoración de la dinámica de la intrusión marina en el acuífero costero del distrito de Las Tablas, cuyo objetivo principal fue disponer de datos integrales sobre el estado y comportamiento de agua subterránea en este acuífero. Para poder cumplir con los objetivos trazados de la presente investigación, fueron desarrollados los siguientes estudios técnicos: la exploración geológica, geofísica y el estudio hidrogeológico.

A partir del estudio geológico y geofísico se ha caracterizado la geometría y resistividad eléctrica de los materiales en la zona de estudio, identificándose cinco unidades principales que son: lavas basálticas, aglomerado, cuarzodiorita, tobas y lutita. Basándose en la interpretación litológica de estas capas geoeléctricas, se elaboró un bloque modelo tridimensional del área de estudio, con diagrama de cercas y perfiles litológicos. Con la generación de este modelo fue posible cuantificar los volúmenes de los distintos materiales que componen el reservorio subterráneo de la zona costera investigada, así como también definir su posición espacial dentro del mismo.

Para comprender las condiciones hidrogeológicas predominantes y determinar el potencial, así como la afectación de agua subterránea por la intrusión marina en la zona costera del distrito de Las Tablas, fueron interpretadas las cinco capas geoeléctricas del subsuelo ya descritas, con distintos rangos de resistividad y espesor, definiéndose con la

información generada que el acuífero costero está representado por dos capas más productivas, como aglomerado y basalto. Mientras tanto, la capa de cuarzdiorita impermeable sirve de muro o base del acuífero, y las otras dos capas (tobas y lutitas), tienen muy poca relevancia en este sistema acuífero.

Durante la realización del estudio hidrogeológico, con el monitoreo de niveles freáticos en pozos existentes, se elaboró el mapa de isopiezas que permitió establecer el gradiente hidráulico y la dirección de flujo del sistema acuífero local. Los resultados piezométricos indicaron que en la zona suroeste del área de estudio se observan los mayores valores de elevación del nivel del agua subterránea con más de 60 msnm, mientras que hacia el noreste el nivel freático desciende progresivamente. También se observó una franja costera de unos 3 km de anchura con valores del nivel freáticos menores de 5 msnm. Acorde con estas características, una gran parte del territorio se define como zona de descarga de acuíferos, con la dirección del flujo noreste hacia el mar y un gradiente hidráulico de $i = 0.56\%$.

Entretanto, con los datos de las pruebas de bombeo, se pudo definir el parámetro de la conductividad hidráulica (k) del acuífero costero. Sus valores de $k=1.5-2.0$ m/día, corresponden a los materiales que conforman el acuífero local, representados por los aglomerados y basaltos fracturados, con una permeabilidad secundaria. Estos valores de permeabilidad permitieron clasificar al acuífero evaluado como un “acuífero pobre”, concordando su caracterización con el Mapa Hidrogeológico de Panamá existente.

Para determinar el posible riesgo de contaminación del acuífero costero por la intrusión marina en el área de estudio, se realizaron los muestreos de los 77 pozos. Con estas mediciones fue posible generar el Mapa de conductividad eléctrica (CE) del agua subterránea de la zona evaluada, que mostró en la mayoría de los pozos, los valores de conductividad entre 400 y 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$, estando dentro del rango establecido, cuyo límite máximo permitido es de 850 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Sin embargo, algunos de los pozos muestreados, localizados a una distancia considerable de 8–10 km de la línea de la costa, registraron valores de conductividad del agua elevados, entre 850 y 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Esta situación probablemente corresponde a la ubicación de los pozos en una zona con intensivas actividades agrícolas, y no necesariamente se adjudica a la contaminación que podría ser generada por el fenómeno de la intrusión marina.

Al realizar la evaluación de la dinámica de la intrusión marina en el acuífero costero del distrito de Las Tablas, se determinó la penetración máxima de la cuña de agua salada en condiciones naturales (sin explotación del acuífero), que fue de $L=150$ metros. Por otra parte, es relevante resaltar que, a pesar de que la calidad química de las aguas subterráneas en el área de estudio es generalmente buena, sí existen problemas

puntuales de la intrusión salina, concretamente en la parte sureste de la franja costera. Al monitorear la calidad del agua de durante la prueba de bombeo en un pozo abandonado, se identificó que este pozo, al igual que un grupo de pozos privados cercanos, con muy poca distancia entre ellos, de unos 50 m o menos, reflejaron valores de conductividad eléctrica por encima de los 10,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Son pozos dedicados exclusivamente al uso agropecuario, ubicados en una zona que se caracteriza por la presencia de pantanos salobres afectados por las fluctuaciones de mareas, con relieve prácticamente plano, típico del ecosistema de manglares. La condición de extremadamente elevados valores de conductividad del agua, permite inferir que los pozos se explotan con una muy alta tasa de extracción, sin control alguno.

Además de realizar la estimación de la dinámica de la intrusión marina en el acuífero costero del distrito de Las Tablas, también se aplicó el método GALDIT, que permitió evaluar la vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la intrusión marina del acuífero costero del área de estudio, generando los respectivos mapas. El mapa de vulnerabilidad actual de los acuíferos ante la intrusión del agua de mar en la zona costera del distrito de Las Tablas, mostró claramente las áreas moderada y altamente vulnerables a la contaminación salina. Estas áreas se localizan en la proximidad a la costa, dentro de los primeros 1500 a 2500 metros, específicamente en la parte este del área de estudio, donde se observan distintas actividades agroindustriales con la explotación de numerosos pozos particulares y una amplia zona de manglares, aledaños al Puerto Mensabé y a la comunidad de El Uverito.

El impacto de la elevación del nivel del mar debido al cambio climático en la vulnerabilidad del acuífero se ha estudiado a través del parámetro L del método GALDIT para los futuros escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 en el año 2050, que suponen una elevación de 0.19 y 0.26 m, respectivamente. Se concluye que no se producirán cambios importantes en la vulnerabilidad del acuífero a la intrusión marina en ambos escenarios, debido a que los niveles piezométricos en el área de estudio se incrementan rápidamente tierra adentro.

De este modo, la generación de los mapas de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la intrusión salina del área de estudio, puede ayudar a las autoridades locales y a las partes interesadas (propietarios de pozos) a regular el uso del agua subterránea, planificar políticas y estrategias efectivas para proteger los recursos hídricos costeros, incluido crear el programa de monitoreo de las aguas subterráneas, tomando en consideración el efecto del cambio climático en el aumento del nivel medio del mar y las disminuciones drásticas de las precipitaciones actuales y futuras.

Al finalizar este estudio pionero a escala local, los resultados de la investigación lograron demostrar que las aguas subterráneas tienen un significativo valor y aplicabilidad en la

solución de problemas de escasez hídrica de la región. Ello servirá de base para las entidades que gestionan los recursos hídricos, no solo en el área de estudio, sino también a nivel nacional, a tomar decisiones acertadas, así como brindar información necesaria a los usuarios para una adecuada utilización y/o protección de dichos recursos.

AGRADECIMIENTOS

El equipo de investigación del proyecto agradece a las siguientes instituciones y organizaciones que acompañaron y brindaron su valioso apoyo en este esfuerzo investigativo:

- A la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT) por su decidida contribución al desarrollo científico–tecnológico de este país.
- Al personal de la Dirección Regional de Los Santos del Ministerio de Ambiente (MiAMBIENTE); del Ministerio de Desarrollo Agropecuario (MIDA) y en especial, del Instituto de Acueductos y Alcantarillados Nacionales (IDAAN).
- Al Municipio de Las Tablas, a los miembros del Comité de Cuenca Hidrográfica denominada “Ríos entre Río Tonosí y Río La Villa”; a las distintas comunidades beneficiarias por su actitud positiva y aporte de conocimiento local.
- Al Centro Regional Universitario de Azuero (CRUA), por el apoyo brindado en la coordinación y realización de la Jornada de Sensibilización y el Ciclo de Conferencias sobre la gestión sostenible de aguas subterráneas en zonas costeras.
- Al todo el equipo de CATHALAC que apoyó la exitosa ejecución de este proyecto y al Consultor MSc. Geólogo Roneldo Arjona, por su valiosa participación y aportes en el desarrollo de esta investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barlow, P. (2003). Ground Water in Freshwater–Saltwater Environments of the Atlantic Coast. Circular 1262. U.S. Department of the Interior. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.
- BBC Mundo. (2012). Cambio climático: el agua subterránea será cada vez más vital. La British Broadcasting Corporation (Corporación Británica de Radiodifusión), Reino Unido.
- Catastro Rural de Tierras y Aguas. (CARTAP, 1968). Geología. Volumen III. Comisión de Reforma Agraria. República de Panamá.
- Chachadi, A.G. and Ferreira, L. (2001). Sea water intrusion vulnerability mapping of aquifers using GALDIT method. Proc. Workshop on modeling in hydrogeology, Anna University, Chennai, pp.143–156.
- Chachadi A. G. and Lobo Ferreira J. P. (2005). Assessing aquifer vulnerability to sea–water intrusion using GALDIT method: Part 2 – GALDIT Indicators Description. IAHS and LNEC, Proc. 4th Inter Celtic Colloquium on Hydrology and Management of Water Resources, July 11–14, 2005, Guimarães, Portugal.
- Comité Científico COP25 (2019). Océano y cambio climático: 50 preguntas y respuestas.

Santiago, Chile.

- Custodio, E. y Llamas M. R. (1976). Hidrología Subterránea. Barcelona.
- Custodio, E. (2017). Salinización de las aguas subterráneas en los acuíferos costeros mediterráneos e insulares españoles. UPC-CETAQUA. Barcelona.
- Custodio, E. (2013). La complejidad de la intrusión marina en los acuíferos costeros en la práctica hidrogeológica. Temas actuales de la hidrología subterránea 2013, p. 367 – 378.
- Dirección General de Recursos Minerales. (DGRM, 1991). Mapa Geológico de la República de Panamá; Escala 1:250000. Ministerio de Comercio e Industrias, República de Panamá.
- ETESA. (1999). Mapa Hidrogeológico de la República de Panamá. Gerencia de Hidrometeorología de ETESA (Empresa de Transmisión Eléctrica, S.A.), Panamá.
- FAO and UN Water. (2021). Progress on Level of Water Stress. Global status and acceleration needs for SDG Indicator 6.4.2, 2021. Rome. <https://doi.org/10.4060/cb6241en>
- Foster, S; Ricardo Hirata, R. y Andreo, B. (2013). The aquifer pollution vulnerability concept: aid or impediment in promoting groundwater protection? Hydrogeology Journal (2013) 21: 1389–1392. DOI 10.1007/s10040-013-1019-7
- González, N. et al. (2013). Temas actuales de la Hidrología Subterránea. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (Edulp), Argentina. 367–378.
- Hamlington, B.D., Bellas-Manley, A., Willis, J.K. et al. (2024). The rate of global sea level rise doubled during the past three decades. Commun Earth Environ 5, 601. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01761-5>
- Instituto Geográfico Nacional “Tommy Guardia”. (IGNTG, 2007). Atlas Nacional de la República de Panamá. Instituto Geográfico Nacional “Tommy Guardia”, Panamá.
- Instituto Geológico y Minero de España. (IGME, 2009). Encomienda de gestión para la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas. Actividad 7: Establecimiento de indicadores de intrusión marina y cálculo de los volúmenes ambientales al mar. España.
- Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria. (IHCantabria, 2023). Desarrollo de una base de datos de dinámicas marinas en las costas panameñas para evaluar impactos y vulnerabilidad por ascenso del nivel del mar. Ministerio de Ambiente, Panamá.
- Instituto Nacional de Estadística y Censo. (INEC, 2023). XII Censo de Población y VIII de Vivienda 2023. Resultados Finales Básicos. Panamá. <https://www.inec.gob.pa/publicaciones/Default.aspx>
- IPCC. (2019). Calentamiento global de 1,5 °C. Resumen para responsables de políticas. OMM/PNUMA. ISBN 978-92-9169-351-1
- IPCC. (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844.

- Opolenko, V. (2016). Sensibilidad Medioambiental a la desertificación en la cuenca del río La Villa, República de Panamá. (Tesis doctoral). Universidad Internacional de Andalucía y Universidad de Huelva, España.
- Opolenko, V. (2022). Identificación y caracterización de potenciales sistemas acuíferos en la parte media y baja de la cuenca del río La Villa, de Panamá. *Revista Geográfica de América Central*, (67), 83–120. <https://dx.doi.org/10.15359/rgac.67-2.4>
- World Meteorological Organization. (WMO, 2024). *Greenhouse Gas Bulletin. The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2023*. ISSN 2078-0796.



CATHALAC

Centro del Agua del Trópico Húmedo
para América Latina y el Caribe

Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latina y el Caribe (CATHALAC).
Edificio 111, Ciudad del Saber, Clayton Ciudad de Panamá, República de Panamá.

Tel: +507-317-3200.

www.cathalac.int