

ESTUDIANDO EL FUNCIONAMIENTO HIDROLÓGICO DEL HUMEDAL DE MATUSAGARATÍ



© Carol E, Alvarez M del P, Candanedo I y Arcia M
© Universidad Tecnológica de Panamá

1era. Edición Panamá.
30 páginas; 8.5"x11"

ISBN 978-9962-13-943-0

1. HIDROLOGÍA 2. DARIÉN 3. MATUSAGARATÍ 4. HUMEDALES

Cita: Carol E, M del P Alvarez, I Candanedo y M Arcia. 2021. *Estudiando el Funcionamiento Hidrológico del Humedal de Matusagaratí*. Universidad Tecnológica de Panamá. Secretaría Nacional de Ciencia Tecnología e Innovación (SENACYT) 32 páginas. Panamá.

Fotografías: María del Pilar Alvarez, Indra Candanedo
Fotografías de dron: Alexis Baúles
Diagramas: María del Pilar Alvarez y Eleonora Carol
Mapas: María del Pilar Alvarez, Manuel Arcia, Alicia Ibáñez y Alexis Baúles
Diagramación: Lorena Carrasco

Universidad Tecnológica de Panamá,
Centro Regional Panamá Oeste
Dirección física: Rincón Solano #2, La Chorrera,
Provincia de Panamá Oeste, República de Panamá
Teléfonos: (507) 244-0377; 244-1450

[Versión digital](#)



Equipo de investigación compuesto por guías locales, investigadores de la Universidad Tecnológica de Panamá y por de las Universidades de La Plata y del Instituto Patagónico de Ecosistemas Continentales (Argentina) colocando los sensores de nivel de aguas subterráneas en la planicie de inundación en el río Tuira.

FOTO DE PORTADA: Atardecer en el río Tuira. Se observa el albardón arbolado seguido de la planicie de inundación dominada por plantas herbáceas, las islas o hamacas de bosque y al fondo los cerros cercanos deforestados.

ESTUDIANDO EL FUNCIONAMIENTO HIDROLÓGICO DEL HUMEDAL DE MATUSAGARATÍ

PRESENTACIÓN

En Panamá, la mayor parte de los estudios hidrológicos han estado orientados a la utilización del recurso hídrico superficial para el funcionamiento del canal y para la generación de energía hidroeléctrica y el uso agropecuario. Más recientemente, se han realizado algunas evaluaciones sobre el estado e hidrodinámica de las aguas subterráneas especialmente en la región del Arco Seco. Poco o nada del esfuerzo ha sido orientado al estudio de la hidrología de los humedales, pese a que el agua es un elemento crítico para la conservación y uso sostenible de estos ecosistemas que están siendo transformados rápidamente a otros usos como crecimiento urbano, ganadería y agricultura.

Los humedales juegan un rol importante en el mantenimiento de la calidad del agua, la conservación de la biodiversidad, la regulación del ciclo hidrológico y el control de inundaciones. También se sabe que los humedales, particularmente los manglares y turberas, son importantes reservorios de carbono, cuya conservación en el suelo es fundamental para la lucha contra el cambio climático. El funcionamiento hidrológico de los humedales es determinante para el mantenimiento de estas reservas de carbono.

En este sentido, el presente informe es una contribución al conocimiento sobre el funcionamiento hidrológico de los humedales en Panamá. Parte de la información aquí presentada ya ha sido publicada en revistas científicas en inglés, pero hemos querido complementar dichos datos con información adicional y más reciente. Este informe profundiza los aspectos hidrológicos del funcionamiento del humedal, presentados en el resumen *Matusagaratí: el Pantanal de Panamá, Resumen para tomadores de decisión*. Esperamos que este informe sea de utilidad para estudiantes, técnicos, investigadores y tomadores de decisión y para motivar el estudio del agua en estos fascinantes y complejos sistemas de humedales como el de Matusagaratí.

Este trabajo ha sido el resultado de una colaboración entre el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) de Argentina, el Centro de Investigaciones Geológicas de la Universidad de La Plata, el Instituto Patagónico para el Estudio de los Ecosistemas Continentales y la Universidad Tecnológica de Panamá con el apoyo de la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT) de Panamá.

Indra Candanedo
Octubre 2021

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer a la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT) por el financiamiento otorgado al Proyecto Hidrología, Vegetación y Avifauna del Complejo de Humedales de Matusagaratí FID17-043.

Agradecemos también al Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas (CIHH) de la Universidad Tecnológica de Panamá, en particular al Dr. José Fábrega, y a los Ingenieros Sidney Saavedra y Ana Franco por sus orientaciones y apoyo técnico y logístico. Apreciamos la colaboración de Alicia Ibáñez en la caracterización de la flora en las áreas donde fueron instalados los sensores de nivel. Igualmente, agradecemos al estudiante Manuel Pérez por su motivación en el trabajo de campo, curiosidad y esfuerzo. Al Centro Regional de la UTP en Panamá Oeste y a la Fundación Tecnológica por su apoyo administrativo.

Finalmente, a nuestros asistentes de campo: Hayro Cunampio, Jorge Tomí, Ismael Flaco y Eduardo Garabato por compartir sus conocimientos y por su apoyo para que el trabajo de campo se realizara sin contratiempos. Damos también las gracias al Señor Juan Castillo y su familia, al Señor Cornelio Murillo del Ministerio de Ambiente en Chepigana, al Señor Salvador Castro, al Ingeniero Alfonso Moreno del Ministerio de Desarrollo Agropecuario en Yaviza y al personal del Ministerio de Desarrollo Agropecuario Iglesias y de la Policía Nacional en Camogantí por permitirnos ubicar los equipos hidrometeorológicos en sus propiedades u oficinas bajo su resguardo.

Finalmente, a nuestras familias por su paciencia y apoyo durante la ejecución de este proyecto.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	07
METODOLOGÍA	08
RESULTADOS	14
MODELO CONCEPTUAL	25
CONCLUSIONES	29
REFERENCIAS	30

En estas regiones las piraguas son el medio de movilización de los investigadores apoyados por los guías locales. Se observa el dosel del bosque mixto semideciduo que domina en el albardón del río Tuira.



INTRODUCCIÓN

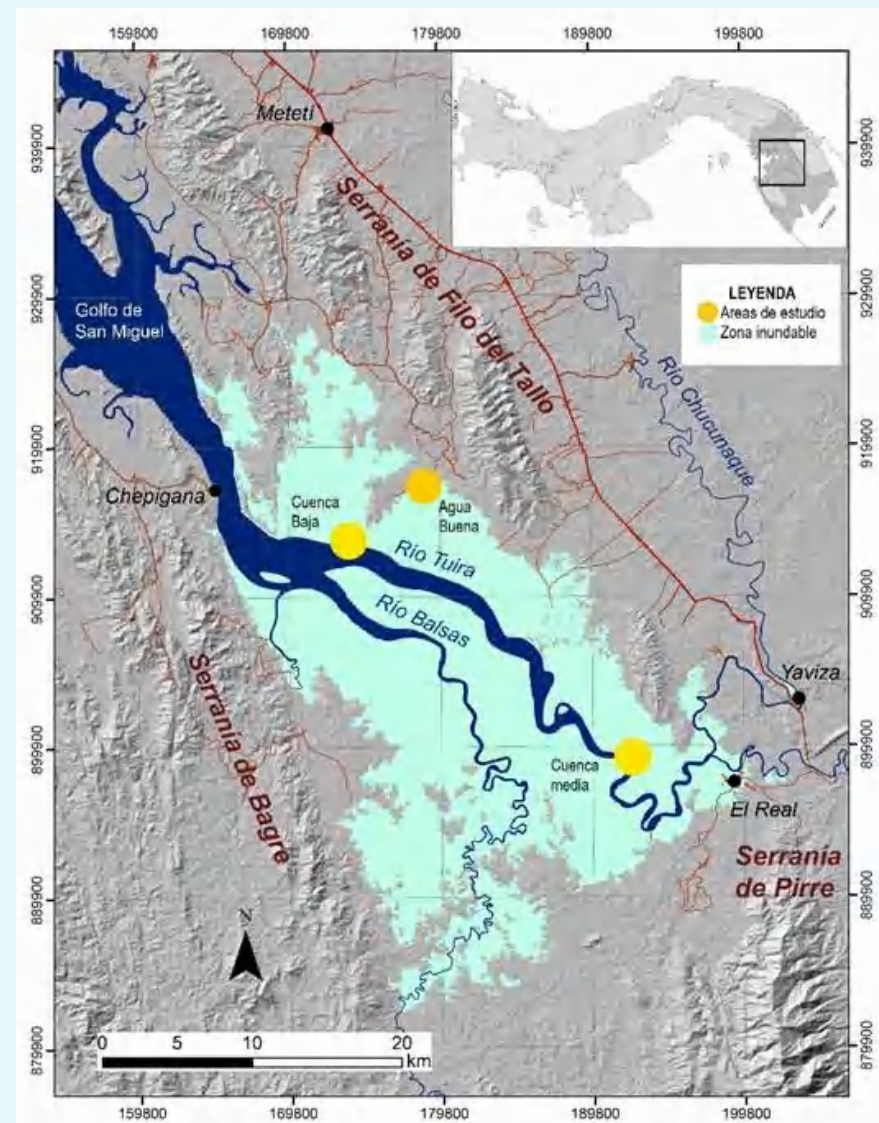
El estudio de la hidrología de humedales fluviales requiere de un enfoque integral que considere las conexiones entre el río y el agua subterránea en los ambientes de humedales adyacentes para así comprender los servicios ecosistémicos que estos ambientes brindan (Bullock y Acreman 2003; Piégay et al. 2005; Verhoeven et al. 2006; Arnaud-Fassetta et al. 2009). El agua superficial está conectada con el agua subterránea y, como resultado, los cuerpos de agua superficial son parte integral de los sistemas de flujo de agua subterránea, existiendo un intercambio de agua entre estos dos componentes del sistema hidrológico (Winter et al. 1998). Por lo tanto, es necesario comprender los principios básicos de la interacción de las aguas subterráneas y superficiales para una gestión eficaz de los recursos hídricos.

El movimiento de las aguas superficiales y subterráneas está controlado en gran medida por la fisiografía del humedal, la cual depende de la topografía y el marco geomorfológico y geológico de un área. A su vez, las entradas (precipitaciones) y salidas (evapotranspiración) de agua de la superficie terrestre están controladas por el clima. Por lo tanto, es necesario comprender los efectos de la fisiografía y el clima en los sistemas de flujo de aguas subterráneas para comprender la interacción de las aguas subterráneas y superficiales (Winter 1999).

El objetivo de este informe es caracterizar la hidrología del humedal de Matusagaratí evaluando cualitativamente los flujos de agua superficial y subterráneos que sustentan al mismo.

METODOLOGÍA

Utilizando los mapas generados por el proyecto se determinaron primeramente dos áreas para enfocar los estudios hidrológicos: la cuenca media y la cuenca baja del río Tuira. Posteriormente, se incluyó el área de Agua Buena para el estudio de las aguas superficiales y subterráneas como puede observarse en el Mapa 1. que se presenta a continuación.



MAPA 1: ubicación general

La caracterización climática del área de estudio se realizó utilizando la información de las precipitaciones antecedentes de la base de datos históricos de la Organización de Estados Americanos (<http://www.oas.org>). Las características geomorfológicas del área se estudiaron en base al análisis del modelo digital del terreno del Instituto Geográfico Nacional Tommy Guardia (resolución 5m), imágenes satelitales del 2017 y trabajo de campo.

Para medir parámetros meteorológicos se instalaron dos estaciones Davis modelo Vantage Pro2, una en la comunidad de Chepigana, en la desembocadura del río Tuira hacia el estuario y la otra en la comunidad de Camogantí en el río Balsas. También se instalaron cuatro pluviómetros Odyssey® en las comunidades de Río Iglesias, Yaviza, Ailigandí y Agua Buena (Fig. 1).



FIGURA 1: Descarga de datos del pluviómetro en Agua Buena en colaboración con ganaderos locales e instalación de estación meteorológica Davis en Chepigana al frente del río Tuira con moradores locales.

A fin de analizar la hidrodinámica de los flujos de agua superficiales y subterráneos, así como también la química del agua en los distintos ambientes del humedal, se definieron, en las cuencas media y baja (Mapa 1), transectos dispuestos de manera perpendicular al río en los que se colocaron puntos de medición y muestreo de agua. Para definir los transectos se consideró la distribución de la vegetación a fin de abarcar diferentes ambientes.

El transecto 1 se localiza en la cuenca media del río Tuira y atraviesa el área de albardón del río y la planicie aluvial que se encuentra detrás, la que incluye a pequeñas elevaciones desarrolladas dentro de la planicie. En este transecto se instalaron 3 piezómetros, el primero se ubica sobre el albardón del río (GW-T1-1) donde hay un bosque mixto semidecídico con un dosel de 20 m y árboles emergentes de aproximadamente 30 metros. Este bosque está dominado por cativo (*Prioria copaifera*) junto con otras especies como

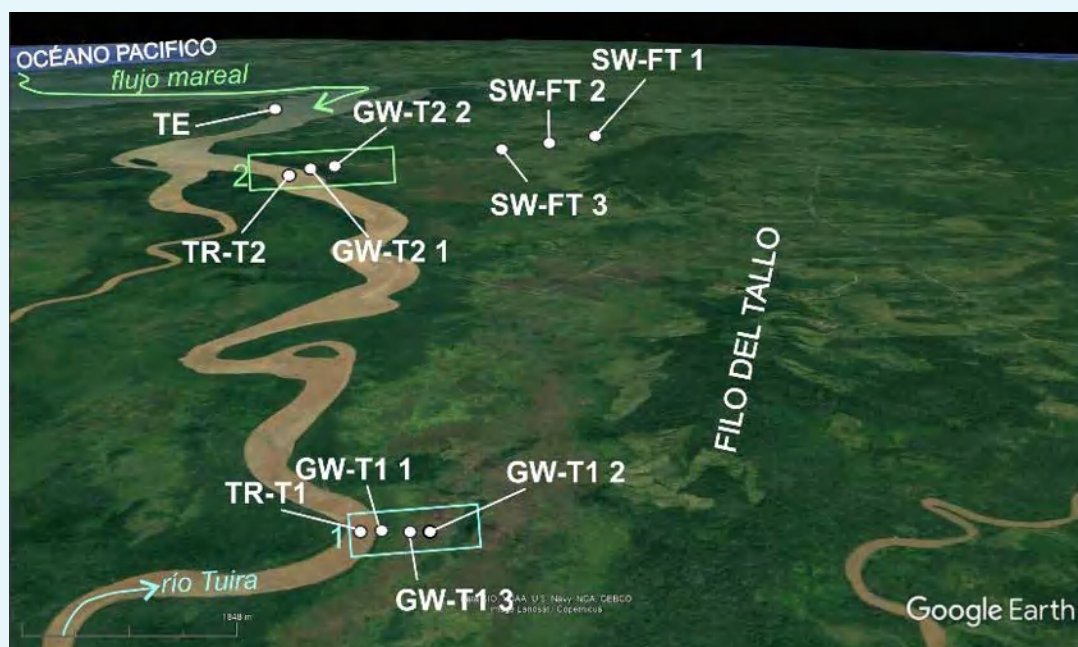
barrigón (*Pseudobombax septenatum*), roble (*Tabebuia rosea*), sangrillo (*Pterocarpus officinalis*), *Macrobolium* sp. La palma conocida localmente como corocita o palma de aceite americano (*Elaeis oleifera*) es abundante en el sotobosque (Fig. 2). En este sector del albardón se observaron numerosas madrigueras de cangrejos.

Detrás del albardón en la zona de planicie de inundación se localizaron los piezómetros GW-T1-2 y GW-T1-3. En esta zona hay un herbazal inundable de 2-3 m de altura aproximadamente, dominado por enea (*Typha domingensis*) en un 90% (Fig. 2), acompañada de especies como clavito (*Ludwigia nervosa*), estrella de agua (*Nymphoides indica*) y helecho de agua (*Salvinia auriculata*). El piezómetro GW-T1-2 fue instalado en una "hamaca" o isla de bosque-arbusto muy pequeña (10 m x 6 m aproximadamente) topográficamente más elevada que la pradera circundante dominada por *Typha*. En esta "hamaca" hay especies como la palma corocita (*Elaeis oleifera*), barrigón (*Pseudobombax*

septenatum), clavito (*Ludwigia nervosa*), enea (*Typha domingensis*), *Calathea lutea* y el helecho *Blechnum serrulatum* (Fig. 2).

El transecto 2 se localiza en la cuenca baja del río Tuira próximo al estuario ubicándose el primer piezómetro (GW-T2-1) en un bosque de mangle caballero de 20-25 m de altura (*Rhizophora racemosa*). El sotobosque era casi exclusivamente *Acrostichum danaeifolium*, un helecho manglar conocido localmente como negra jorra. El segundo piezómetro (GW-T2-2) se instaló en un bosque de alcornoque (*Mora oleifera*) con árboles de entre 12-15 m de altura, mezclado ocasionalmente árboles de mangle caballero (*Rhizophora racemosa*). Nuevamente, el sotobosque de este bosque estaba casi completamente cubierto por helechos manglar (*Acrostichum danaeifolium*) (Fig. 2). En este sector se observaron numerosas madrigueras de cangrejos, principalmente en el sitio donde domina el bosque de manglar.

FIGURA 2: mapa de localización de los sitios de muestreo. TR= Tuira; T1= transecto 1; GW=agua subterránea; T2= transecto 2; SW=agua superficial; FT= Filo del Tallo. Fotos: la fila superior de izquierda a derecha: primer sensor de nivel de agua subterránea del transecto 2 (más cerca al río) y el luego segundo sensor y dos sitios de muestreo de agua superficial en Filo del Tallo. En la fila inferior de izquierda a derecha se observan los sitios donde se ubicaron los sensores de nivel de agua subterránea en el transecto 1: el primero sobre el albardón, el segundo sobre la planicie de inundación y el tercero en la isla o "hamaca". La última foto corresponde a un tercer sitio de monitoreo de agua superficial cerca del Filo del Tallo.



Posteriormente también se instaló un piezómetro (GW-FT3) en el sector de humedal cercano a Filo del Tallo en Agua Buena en las proximidades del punto SW-FT3 (Fig. 3). Este sector se encuentra alejado del río Tuira en un área del humedal donde domina la vegetación de tipo herbazal inundable (Fig. 3). Durante la época de lluvias, este sector del humedal se cubre de numerosas plantas acuáticas como la lenteja de agua (*Lemna minor*), la lechuga de agua (*Pistia stratoites*) y los nenúfares (*Nymphaea pulchella*).

FIGURA 3: a la izquierda el piezómetro GW-FT3 en periodo seco y a la derecha el humedal a metros del piezómetro GW-FT3 mostrando el agua de lluvia acumulada en superficie en los sectores deprimidos.



Las perforaciones donde se instalaron los piezómetros fueron realizadas a 3 m de profundidad con un barreno manual marca Eijkelkamp de 2¾ pulgadas. Durante la perforación se describieron los sedimentos, midiendo *in situ* el Eh (potencial de reducción) con un equipo multiparamétrico portátil marca Lutron y tomando muestras para la medición en laboratorio del pH (medida de acidez o alcalinidad) y conductividad eléctrica (indicativa de la salinidad) en extracto de saturación con el mismo equipo multiparamétrico (Fig. 4). Con las descripciones de textura *in situ* y los resultados de laboratorio se graficaron los perfiles de suelo para poder evaluar las variaciones en profundidad de los parámetros estudiados.



FIGURA 4: Muestreo de sedimentos durante la realización de las perforaciones y medición de parámetros en campo con sonda multiparamétrica.

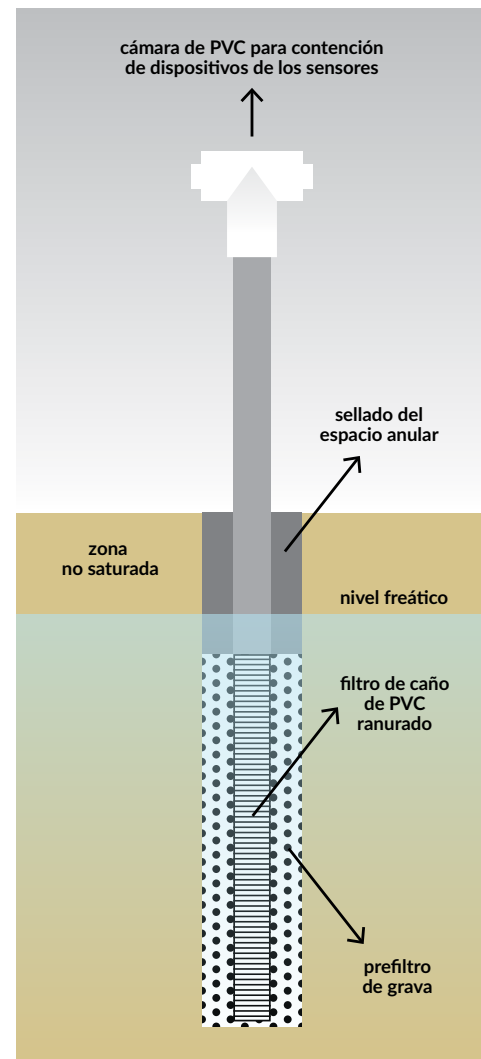


FIGURA 5: Fotografía de un piezómetro instalado y esquema constructivo del mismo.

Los piezómetros fueron entubados con un tubo de PVC con filtro ranurado continuo envueltos en una malla fina, relleniéndose en espacio anular con prefiltro de grava silíceo y sellándose la parte superior del espacio anular del pozo. Un esquema del diseño de los piezómetros se indica en la figura 5.

Luego de la limpieza del pozo mediante su vaciado con bailer se midió *in situ* en cada punto de monitoreo el pH, Eh, temperatura y conductividad eléctrica del agua con un equipo multiparamétrico marca Lutron. Posteriormente, se tomaron muestras de agua las cuales fueron filtradas y almacenadas en

botellas de polipropileno. En cada punto se extrajeron 2 muestras, una almacenada sin conservantes en la cual se efectuaron determinaciones de isotopos estables de la molécula de agua, y otra que fue acidificada con ácido nítrico al 1% en la cual se efectuaron determinaciones de elementos de tierras raras (REE). A estos puntos de muestreo se incorporaron dos puntos de muestreo en el río Tuira adyacentes a los transectos (TR y TR-E1) y uno más cercano al estuario (TE).

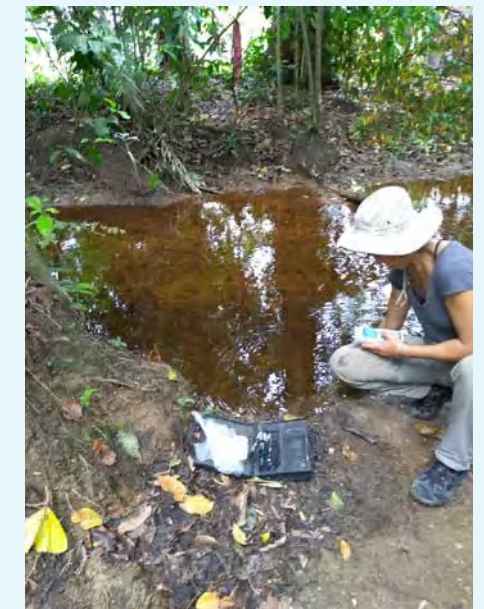
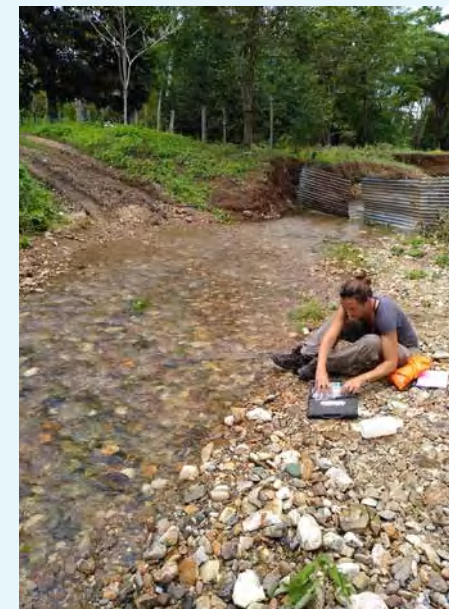
Luego de la toma de muestras de agua se instalaron dentro de los piezómetros sensores de registro continuo de nivel del agua marca Odyssey®. Asimismo, se instalaron sensores de nivel de la misma marca en el cauce del río Tuira en la zona de Yaviza y Chepigana. Estos sensores están compuestos por el datalooger que registra la posición del nivel de agua y almacena el dato en una memoria interna que puede almacenar hasta 32000 lecturas. En todos los casos los sensores fueron previamente calibrados y configurados para registrar los datos de nivel cada hora.

Estos equipos fueron instalados dentro de un tubo de PVC para resguardarlos de las inclemencias del tiempo, incendios particularmente en el herbazal inundable y agentes externos como personas o animales. Para descargar los datos se utilizó el software Odyssey Data Flow Systems (Fig. 6).

FIGURA 6: Calibración de sensores de nivel de aguas subterráneas.



FIGURA 7: Medición de parámetros fisicoquímicos del agua y muestreo de agua superficial de los arroyos que drenan desde Filo del tallo.



Los datos de niveles de los sensores de nivel instalados fueron comparados con los de niveles del río y con los de precipitación. La comparación entre niveles del río y los subterráneos permitirá analizar los intercambios de flujos entre el agua superficial y el agua subterránea. La comparación de niveles de agua subterránea con los datos de lluvias se efectuará a fin de visualizar la influencia de la infiltración de la lluvia hacia el agua subterránea del humedal.

Además, se tomaron muestras de agua superficial de los arroyos que drenan del Filo del Tallo (Fig. 7, SW-FT1, FT2 y FT3). Las muestras de agua superficial en el río Tuira se tomaron directamente con botellas desde el bote y en los arroyos del Filo del Tallo dentro de los arroyos. En todos los casos, las botellas de muestreo se limpiaron tres veces con agua de río o arroyo antes de tomar la muestra.

Los isotopos estables de la molécula de agua ($\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$) se midieron mediante espectroscopía de masas (espectrómetro de masas de flujo

continuo Thermo Finnigan MAT Delta Plus XL) en el laboratorio de isotopos estables de la Universidad de San Luis (Argentina). Los resultados isotópicos se expresan como δ ‰, siendo $\delta = 1000 (R_s - R_r) / R_r$ ‰, donde δ es la desviación isotópica en ‰ en relación con la media estándar del agua oceánica de Viena (V-SMOW) (Gonfiantini, 1978); s es la muestra; r la referencia internacional; R : relación isotópica ($^2\text{H} / ^1\text{H}$, $^{18}\text{O} / ^{16}\text{O}$). La precisión analítica de la determinación es de $\pm 0,05$ ‰ y $\pm 0,5$ ‰, para $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, respectivamente. A fin de evaluar el aporte del agua de las lluvias hacia el humedal, los valores isotópicos fueron comparados con la recta meteórica local $\delta^2\text{H} = 7,63 \delta^{18}\text{O} + 6,51$ la cual fue definida para la costa del Pacífico en el sector central de Panamá por Kern et al. (2016). Para el caso del transecto 1 se trazó una línea de mezcla teórica considerando como miembros extremos a la composición media de las muestras ubicadas en los sectores más elevados de Filo del Tallo (SW-FT 1 y SW-FT 2) y el agua de la muestra próxima al estuario (TE). Asimismo, para analizar la

propagación de la marea en el cauce del río se realizó una mezcla entre el agua del río Tuira y la de la muestra próxima al estuario.

Las determinaciones de tierras raras (REE) fueron realizadas en el Centro de Investigaciones Geológicas mediante ICP-MS con una precisión analítica de $\pm 0,001\mu\text{g/L}$. Para su análisis los resultados de REE fueron normalizados al valor de la corteza continental superior (Rudnick y Gao, 2003). La normalización consistió en dividir el valor de REE obtenidos en las muestras por el de la composición media de la corteza superior y graficar estos datos para cada uno de los elementos de las tierras raras en un orden creciente de número atómico, desde las más livianas (La) a las más pesadas (Lu). La comparación de los patrones normalizados de REE de todas las muestras permitió evaluar la procedencia de los flujos de agua que ingresan al humedal.

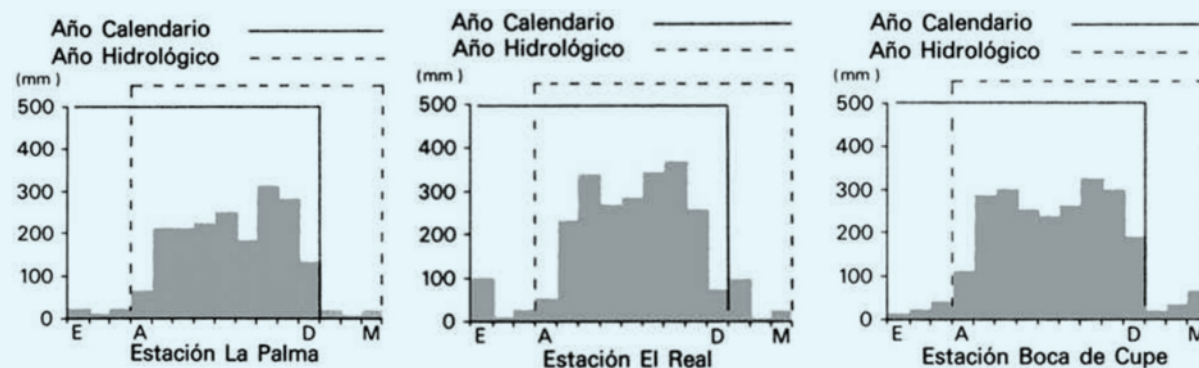
RESULTADOS

A. Características climáticas generales del área de estudio

En vista de que las estaciones meteorológicas instaladas en el proyecto no habían llegado a registrar un año hidrológico completo, se optó por describir las precipitaciones de la zona de estudio en base a datos históricos existentes para el área. Los antecedentes recabados indican que las precipitaciones varían entre 1700 mm y 2800 mm anuales (Organización de Estados Americanos <http://www.oas.org>) presentando el régimen climático una alta variabilidad intra-anual, existiendo una época de lluvias y una época seca. La

época de lluvias se extiende desde mayo hasta fines de noviembre acumulando aquí el 85% del total anual de las precipitaciones. Según la información dada por los lugareños en el sector de Yaviza, durante el período de lluvias los ríos pueden incrementar notablemente su caudal y provocar graves inundaciones. El resto del año comprende la época seca, periodo en el que ocurren el 15% restante de las lluvias, condición que sumado a las altas temperaturas (valores medios anuales de 27°C) propician los procesos de evapotranspiración (Fig.8).

FIGURA 8: Ubicación de las estaciones meteorológicas de La Palma, El Real y Boca de Cupe y gráficos de precipitaciones medias mensuales históricas mostrando la variación intra-anual. Datos de El Real 1955-1975; Boca de Cupe 1962-1975; La Palma 1921-1975 (fuente: <http://www.oas.org/dsd/publications/unit/oea30s/ch036.htm#TopOfPage>).



B. Características geomorfológicas y suelos del área de humedal

El área del humedal de Matusagaratí se desarrolla en ambientes fluviales asociados al río Tuira. Este río nace en la zona montañosa y escurre hacia el noroeste aumentando en su recorrido el ancho del cauce de manera considerable hasta desembocar en el Golfo de San Miguel, en el océano Pacífico. Con sus afluentes tributarios comprende una cuenca cercana a las 900.000 hectáreas, caracterizándose los sectores de cuenca media y baja por presentar extensas áreas de planicie de inundación en donde se desarrollan ambientes de humedales. Particularmente en la cuenca baja la influencia mareal desde el golfo de San Miguel determina el desarrollo de pequeños canales de marea que se asocian al curso del río. Estos canales de marea presentan en planta morfologías sinuosas de látigo y su presencia permite el ingreso del agua mareal hacia zonas de la planicie de inundación. A estas zonas de planicies de inundación también ingresan aportes de agua de los ríos que bajan desde los filos serranos adyacentes, estudiándose específicamente en el proyecto aquellos derivados desde Filo del Tallo (Fig.9).

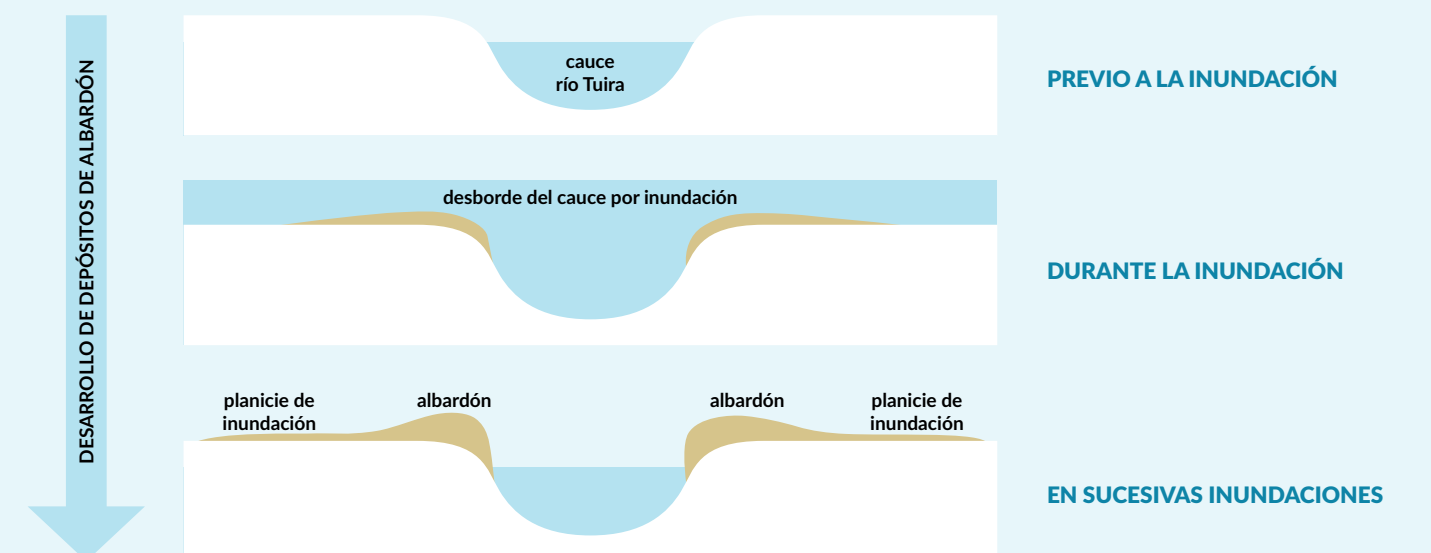
Las planicies de inundación son áreas planas topográficamente bajas que se



FIGURA 9: Filo del Tallo dentro de la Reserva hidrológica del mismo nombre. Aquí nacen los arroyos que pasan por los potreros y drenan al humedal.

encuentran adyacentes al cauce del río las cuales son ocupadas por el agua del río cuando este desborda. Durante estos eventos de inundación los sedimentos transportados por el río se depositan dando lugar a depósitos de albardón en los sectores más próximos a las márgenes del cauce (Fig. 10).

FIGURA 10: Esquema de la formación de depósitos de albardón y planicie de inundación.



Las características de los depósitos que conforman al sustrato del humedal fueron estudiadas a partir de la descripción litológica de las perforaciones efectuadas en los dos transectos en las cuales también se midió la variación en profundidad de parámetros fisicoquímicos tales como Eh, pH y salinidad (expresada como conductividad eléctrica) de los sedimentos.

En el transecto 1 se observa que, si bien existe un predominio de sedimentos limo arcillosos, en la perforación efectuada en el albardón (GW-T1-1) los sedimentos más superficiales tienden a presentar una textura más limosa. En todas las perforaciones es frecuente la presencia de óxidos de hierro con tonalidades marcadamente rojizas a anaranjadas los cuales se asocian principalmente a la zona radicular. Fuera de esta zona, las arcillas tienden a tonalidades gris-verdosas (Fig. 11). El Eh registrado es principalmente positivo con valores cercanos a 300 mv, cambiando a negativo a profundidades mayores a 2,5 y 3,3 m en las perforaciones GW-T1-1 y GW-T1-3 respectivamente (Fig. 9). El pH por su parte registró valores levemente inferiores a 5 mostrando que el humedal se caracteriza por presentar suelos ácidos, característicos de ambientes con abundancia de materia orgánica.

La conductividad eléctrica del suelo es mayor en la perforación GW-T1-3 localizada en el área topográficamente deprimida dentro de la planicie de inundación presentado en superficie valores de 1,4 mS/cm y de 2,2 mS/cm a 3 m de profundidad. En las perforaciones GW-T1-1 y GW-T1-2 la conductividad eléctrica del suelo es menor (Fig. 9). En GW-T1-1 tiene valores cercanos a 0,5 mS/cm desde la superficie y hasta los 1,8 m de profundidad aumentando luego a 1,4 mS/cm a los 3 m de profundidad. En GW-T1-2 la conductividad eléctrica del suelo tiene valores cercanos a 0,5 mS/cm desde la superficie y hasta los 3,2 m de profundidad aumentando luego a 1,4 mS/cm a los 3,4 m de profundidad.

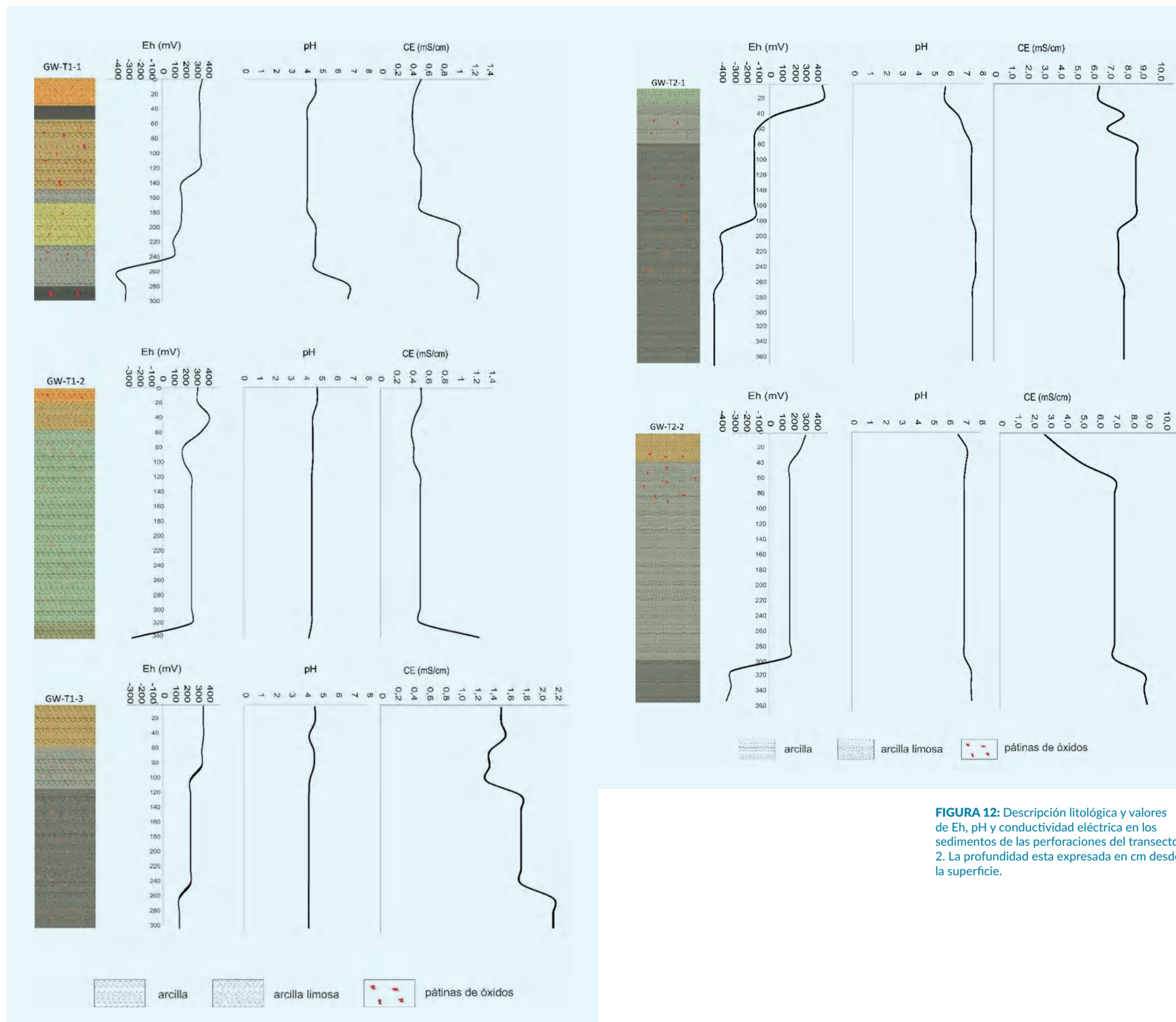


FIGURA 11: Descripción litológica y valores de Eh, pH y conductividad eléctrica en los sedimentos de las perforaciones del transecto 1. La profundidad está expresada en centímetros desde la superficie.

En el transecto 2 los sedimentos son principalmente arcillosos a limo arcillosos de coloraciones gris-verdosa (Fig. 12). La perforación GW-T2-1 particularmente es la que registra los valores de Eh más reductores tornándose negativos a los 0,5 m de profundidad. En esta perforación los pH son levemente ácidos en superficie pasando a valores cercanos a 7 en profundidad. Por su parte la conductividad eléctrica del suelo varía entre 6 y 9 mS/cm, presentándose los valores menos salinos en los sectores más superficiales. En la perforación GW-T2-2 los valores de Eh son positivos hasta los 3 m de profundidad en donde cambian a valores negativos, siendo el pH muy poco variable con valores cercanos a 7. La conductividad eléctrica varía entre 2,5 y 7 mS/cm entre superficie y 0,6 m de profundidad, manteniéndose ese valor relativamente constante hasta los 3 m de profundidad, donde aumenta a valores cercanos a 9 mS/cm.

FIGURA 12: Descripción litológica y valores de Eh, pH y conductividad eléctrica en los sedimentos de las perforaciones del transecto 2. La profundidad está expresada en centímetros desde la superficie.

C. Relación entre los flujos de agua superficial, agua subterránea y precipitaciones

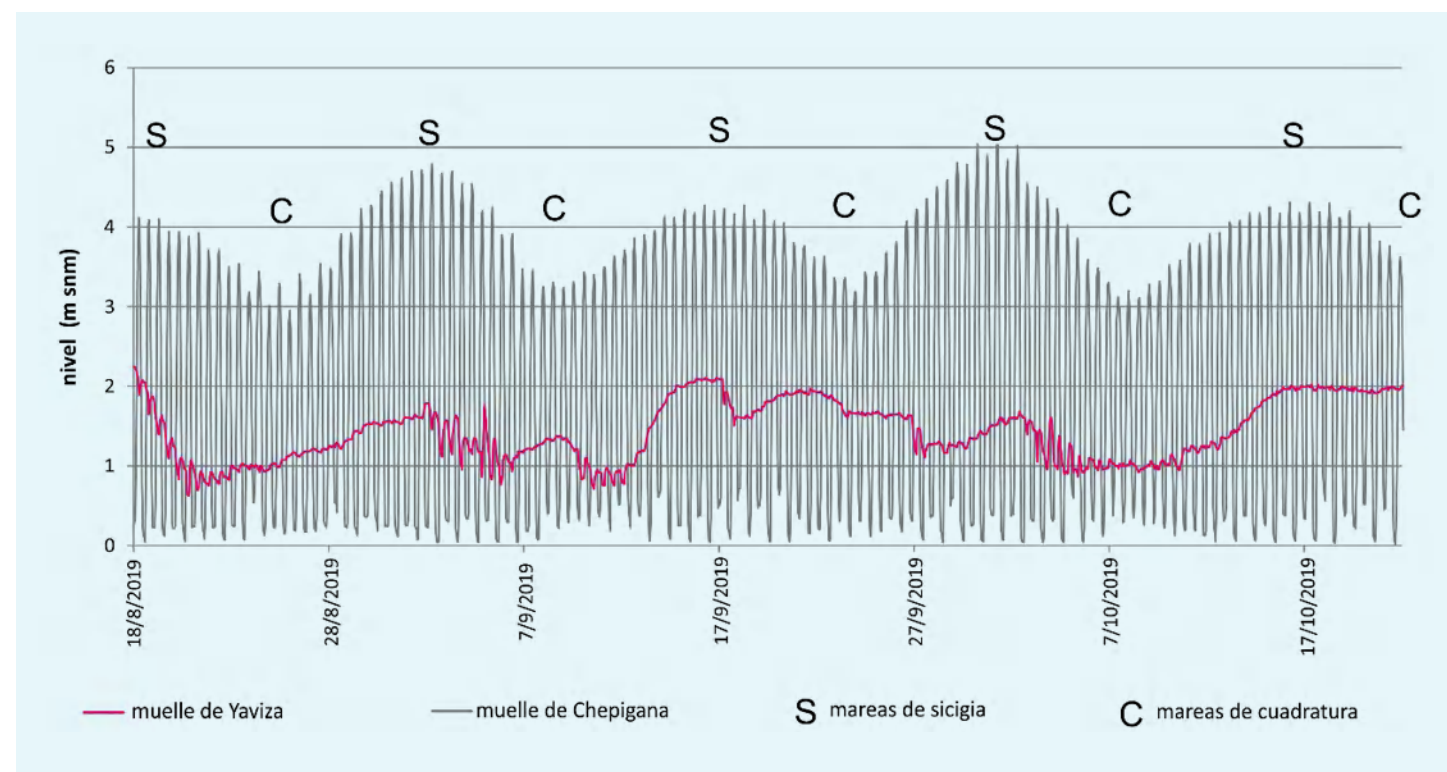


FIGURA 13: Niveles de agua en el río Tuira en los muelles de Chepigana y Yaviza.

La dinámica del río Tuira varía desde el área de cuenca alta hacia el área de cuenca baja. Esto se observa claramente si se comparan los niveles de agua del río registrados en el muelle de Yaviza en cuenca alta, con los registrados en el muelle de Chepigana ubicado en cuenca baja (Fig. 13). La comparación de los dichos registros permite visualizar que existen dos comportamientos. Por un lado, en el muelle de Chepigana el nivel de agua del río responde a la propagación de la marea desde el Golfo San Miguel dado por un régimen meso mareal (de amplitudes máximas cercanas a 5 m) con alternancia de periodos de cuadratura (con amplitudes cercanas a 3 m) y sicigia (con amplitudes entre 4 y 5 m). Nótese en el registro que en bajamar se aplanan marcando el nivel base en el que se produce la descarga hacia el estuario.

Por su parte, en los registros obtenidos en el muelle de Yaviza el nivel de agua del río registra ascensos y descenso principalmente asociados al escurrimiento de los excesos de las precipitaciones. Sin embargo, el efecto

de la marea también se registra en estos niveles de agua del río como pequeñas oscilaciones. No obstante, si se analizan en detalle (Fig. 13) se observa un desfase entre las pleamares medidas en el muelle de Chepigana y los ascensos en el nivel del río en el muelle de Yaviza. Esto se debe al tiempo de retardo de la propagación de la marea por el curso del río desde el estuario hacia cuenca alta. Esto produce en ocasiones que las pleamares registradas en Yaviza coincidan temporalmente con bajamares en Chepigana.

Si se comparan los niveles de agua del río en el muelle de Yaviza, con la precipitación registrada en la estación meteorológica instalada en esta comunidad (Fig. 14) se observa que, si bien existe mayormente una correspondencia entre los eventos de precipitación y los ascensos de nivel en el río, existen situaciones en que esta relación no es tan directa. Esto se debe a que el nivel del río registrado en Yaviza no depende estrictamente de la precipitación local, sino que también está condicionado por las

precipitaciones que capta la cuenca aguas arriba de esta estación las cuales pueden variar respecto de la registrada en Yaviza.

La comparación de los niveles de agua subterránea de los piezómetros del transecto 1 con los datos de niveles del río Tuira en Chepigana y las precipitaciones de la estación Yaviza permite analizar la relación entre los flujos de agua superficial y subterránea, así como su relación con las precipitaciones (Fig.15). En primer lugar, si se comparan los niveles de agua subterránea entre los tres piezómetros se observa que el agua subterránea en el albardón (punto GW-T1-1) se encuentra en una posición más alta que la de los piezómetros ubicados en el área de planicie de inundación (puntos GW-T1-2 y GW-T1-3). Esto evidencia que existe dentro del humedal un flujo de agua subterránea desde el albardón hacia la planicie de inundación. Asimismo, el nivel de agua subterránea de la isla ubicada dentro de la planicie de inundación (punto GW-T1-2) presenta una posición más elevada que el de la planicie de inundación (punto GW-T1-3). Esto indicaría que las áreas deprimidas de la planicie de inundación funcionan como zonas de descarga de agua subterránea.

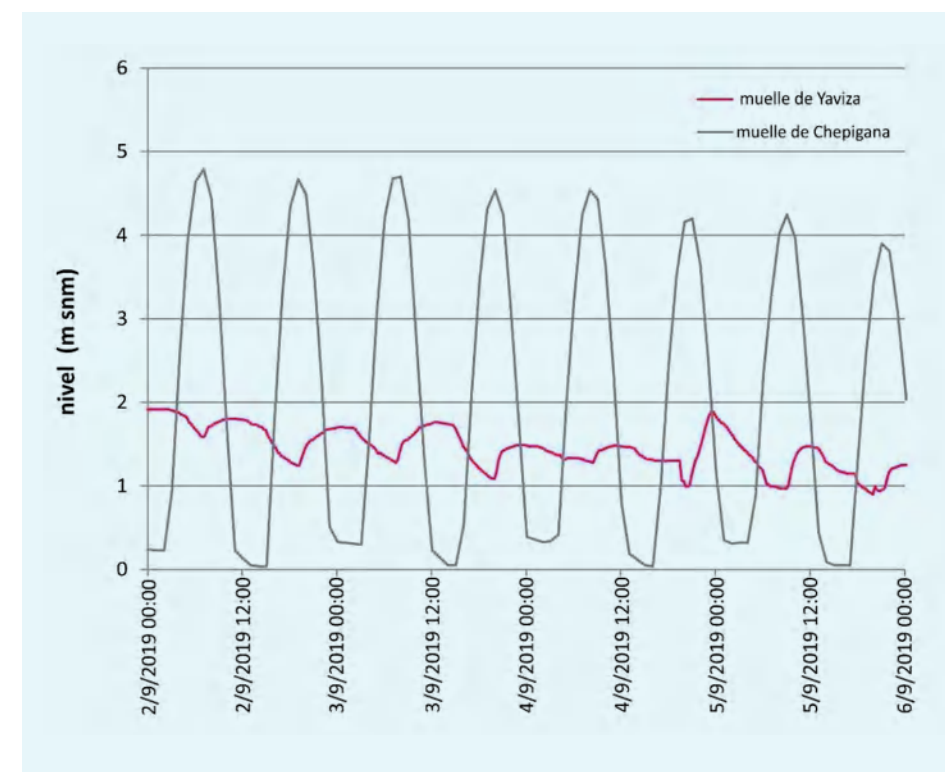


FIGURA 14: Detalle de niveles de agua en el río Tuira en los muelles de Chepigana y Yaviza.

FIGURA 15: Comparación de datos de precipitación y niveles de agua en el río Tuira registrados en Yaviza.



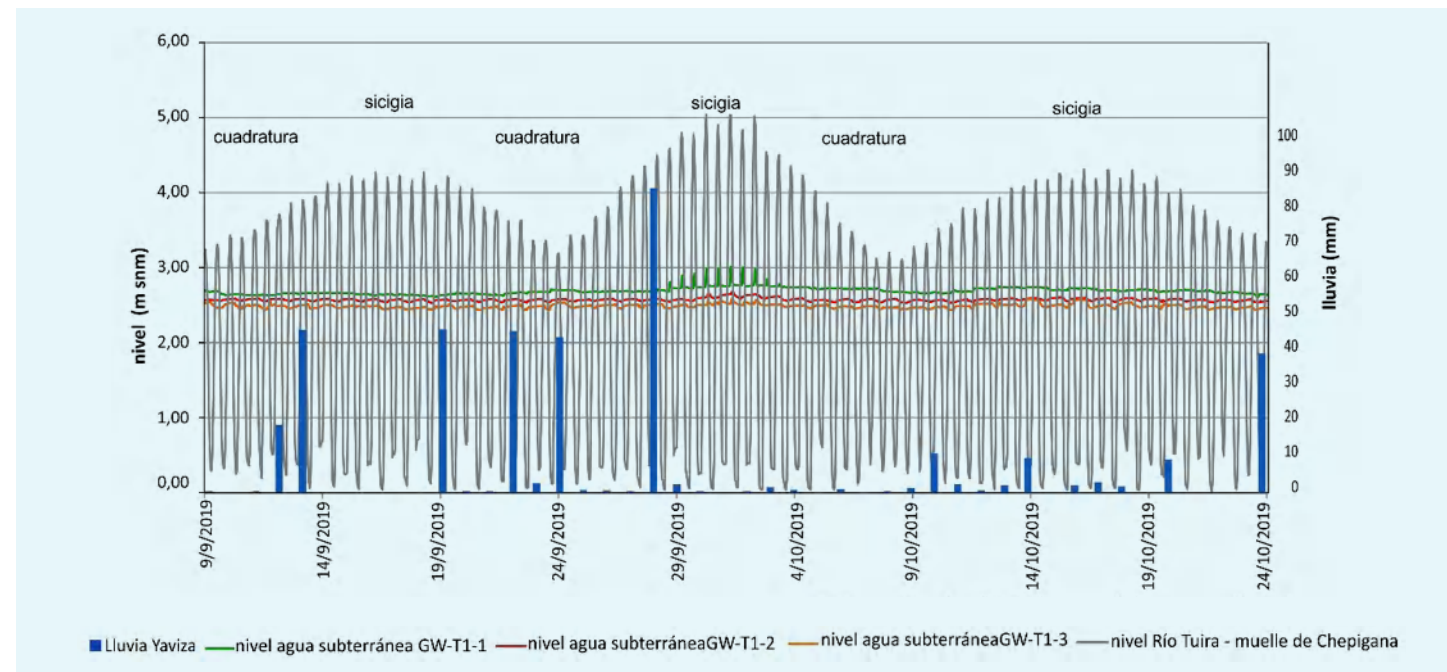


FIGURA 16: Comparación de datos de precipitación de la estación Yaviza, niveles de agua en el río Tuira en Chepigana y niveles de agua subterránea en piezómetros del transecto 1.

Por otro lado, si se comparan los niveles freáticos de los tres piezómetros con el nivel de agua en el río se observa que en las pleamares de sicigia que superan los 4,5 m snm ocurre una oscilación en el nivel de agua subterránea en la zona de albardón que acompaña a la oscilación mareal del río (Fig. 16 y 17). Esto muestra un cambio en la relación que existe entre los flujos de agua superficial y subterránea en la zona de albardón del humedal. Durante la marea baja o en pleamares con niveles por debajo de 4 m snm el agua subterránea descarga en el río, característica que pudo observarse también en las zonas de barrancas durante la marea baja. Cuando la pleamar supera los 4,5 m snm se produce la inundación de parte del albardón y el agua del río ingresa en los sedimentos constituyendo una fuente de recarga hacia el agua subterránea.

Por su parte, en los piezómetros localizados en el área de planicie de inundación si bien también se observa una oscilación con un periodo similar al de la marea ésta es muy leve y podría relacionarse a un efecto mecánico. En todos los casos existe un desfase entre los picos de marea en el río y en el agua subterránea el cual puede atribuirse al tiempo de retardo de la propagación de la marea entre el muelle de Chepigana (nivel medido del río) y el sitio donde

se localiza el transecto 1. Por último, si se comparan los datos de niveles de agua subterránea con los de las precipitaciones registradas en Yaviza (Fig. 16 y 17) se observa que no existen marcados ascensos en los niveles de agua asociados a las lluvias.

FIGURA 17: Detalle de la figura 16 donde se muestra una comparación de datos de precipitación de la estación Yaviza, niveles de agua en el río Tuira en Chepigana y niveles de agua subterránea en piezómetros del transecto 1.

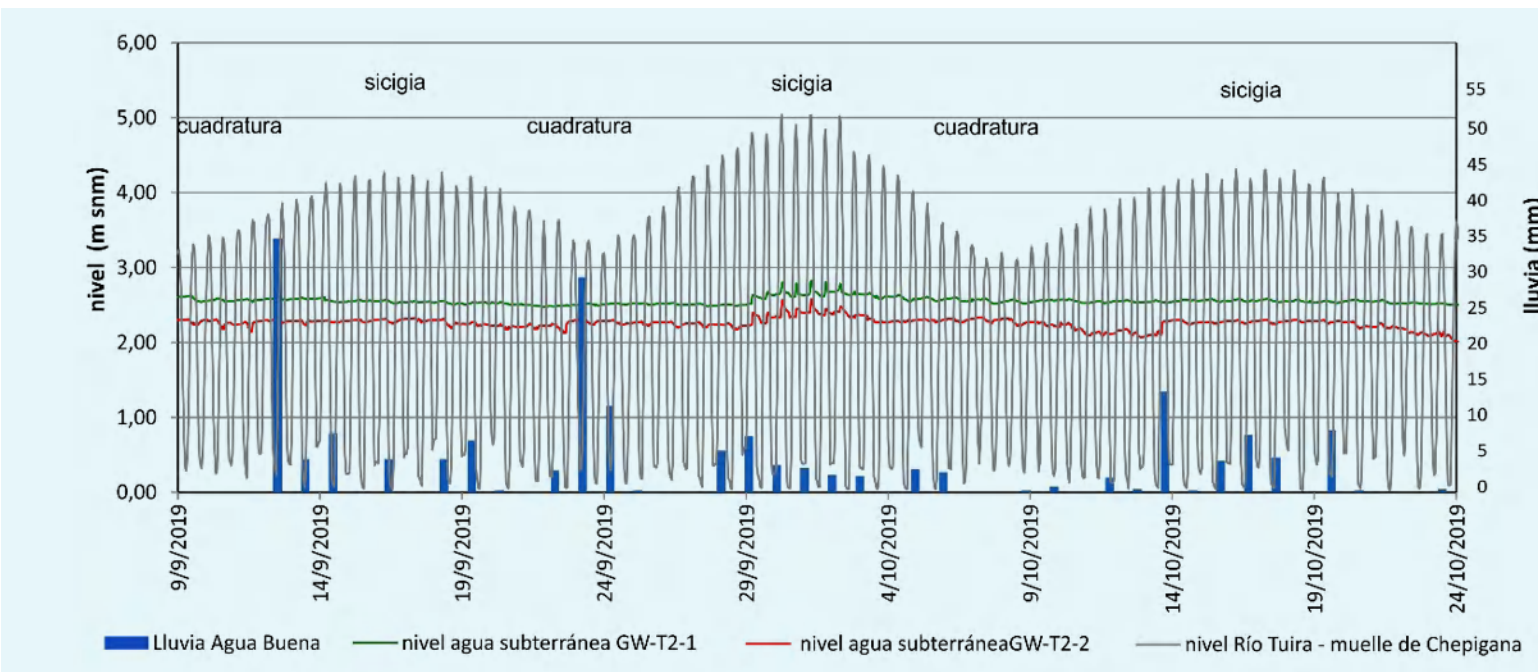
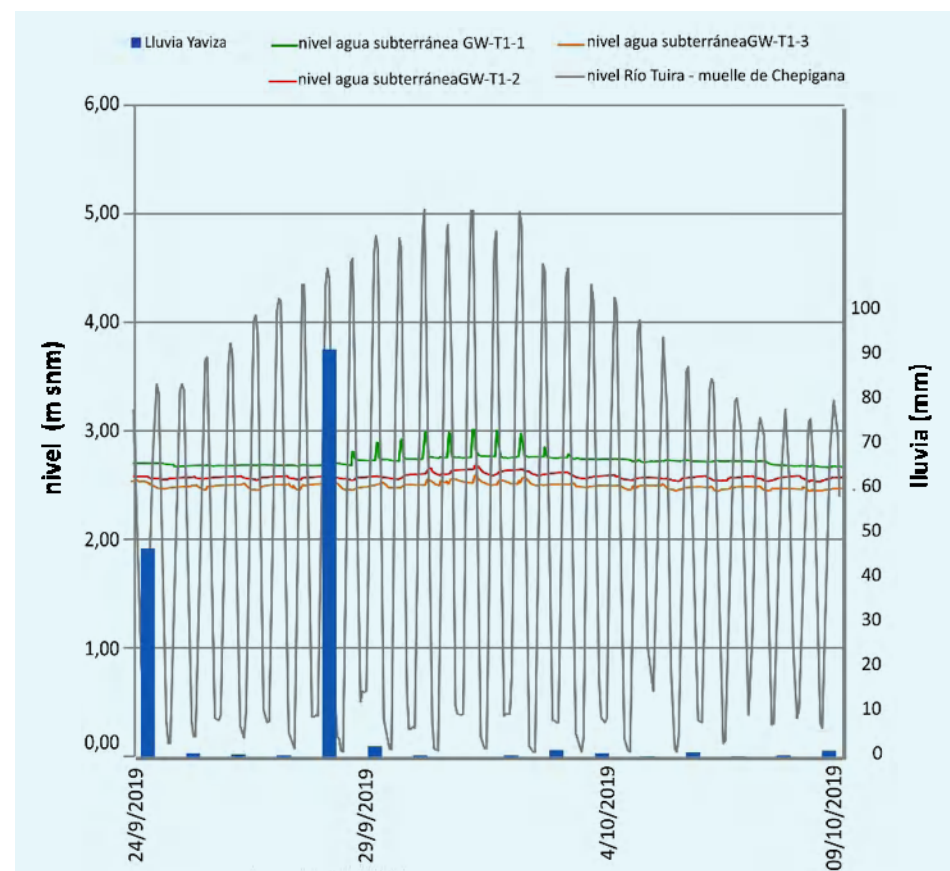


FIGURA 18: Comparación de datos de precipitación de la estación Agua Buena, niveles de agua en el río Tuira en Chepigana y niveles de agua subterránea en piezómetros del transecto 2.

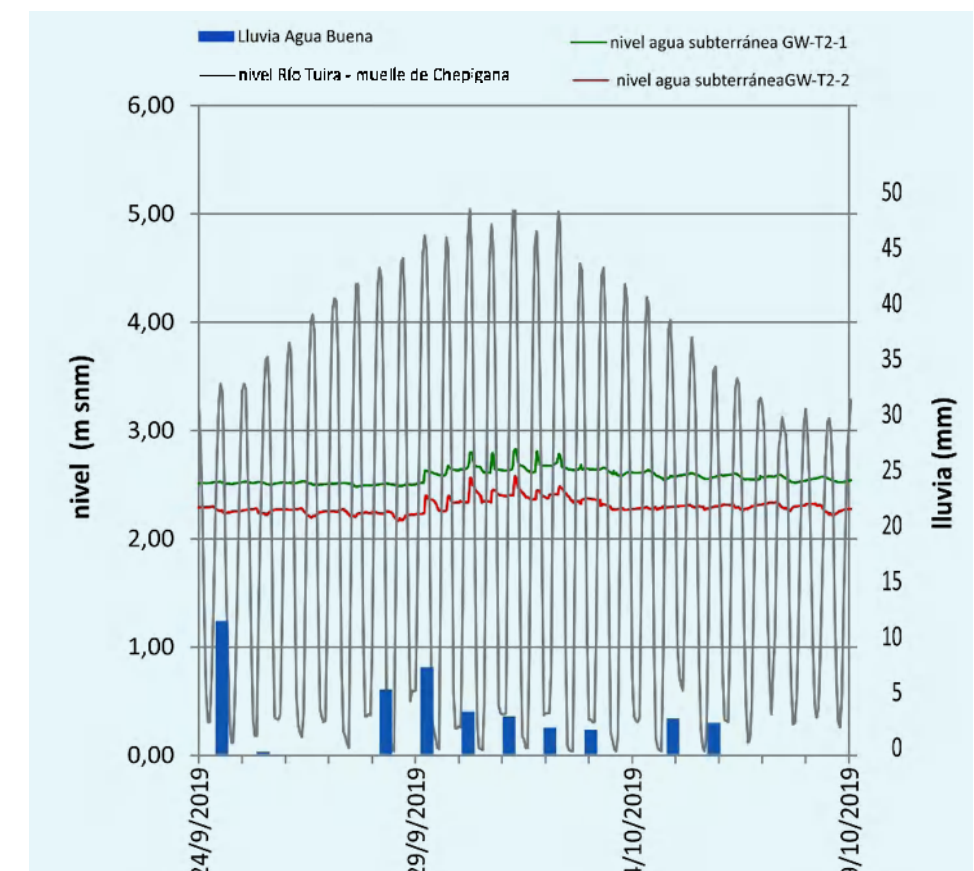
Al igual que en el transecto anterior, la comparación de los niveles de agua subterránea de los piezómetros del transecto 2 con los datos de niveles del río Tuira en Chepigana y las precipitaciones de la estación Agua Buena (Fig.18) permite analizar la relación entre los flujos de agua superficial y subterránea, así como su relación con las precipitaciones. La comparación de los niveles de agua subterránea muestra que el piezómetro ubicado en el albardón (punto GW-T2-1) presenta un nivel más alto que el piezómetro ubicado en la planicie de inundación (puntos GW-T2-2). Al igual que en el transecto anterior, esto muestra que existe un flujo de agua subterránea desde el albardón hacia la planicie de inundación.

La comparación de los niveles de agua subterránea con los del río Tuira en Chepigana muestra que en ambos piezómetros el nivel de agua subterránea se encuentra influenciado por las mareas de sicigia cuyas pleamares superan los 4,5 m snm. La influencia de la marea en los sectores de planicie localizados detrás del albardón estaría asociada a canales de marea que atraviesan al albardón y facilitan la propagación del área mareal hacia los sectores de planicie de inundación más distantes de la margen del río. Si se analizan en detalle los niveles en los días de mareas de sicigia por encima de 4,5 m snm se observa que los ascensos en los niveles freáticos registran picos

asimétricos, con ascensos bruscos y descensos menos marcados.

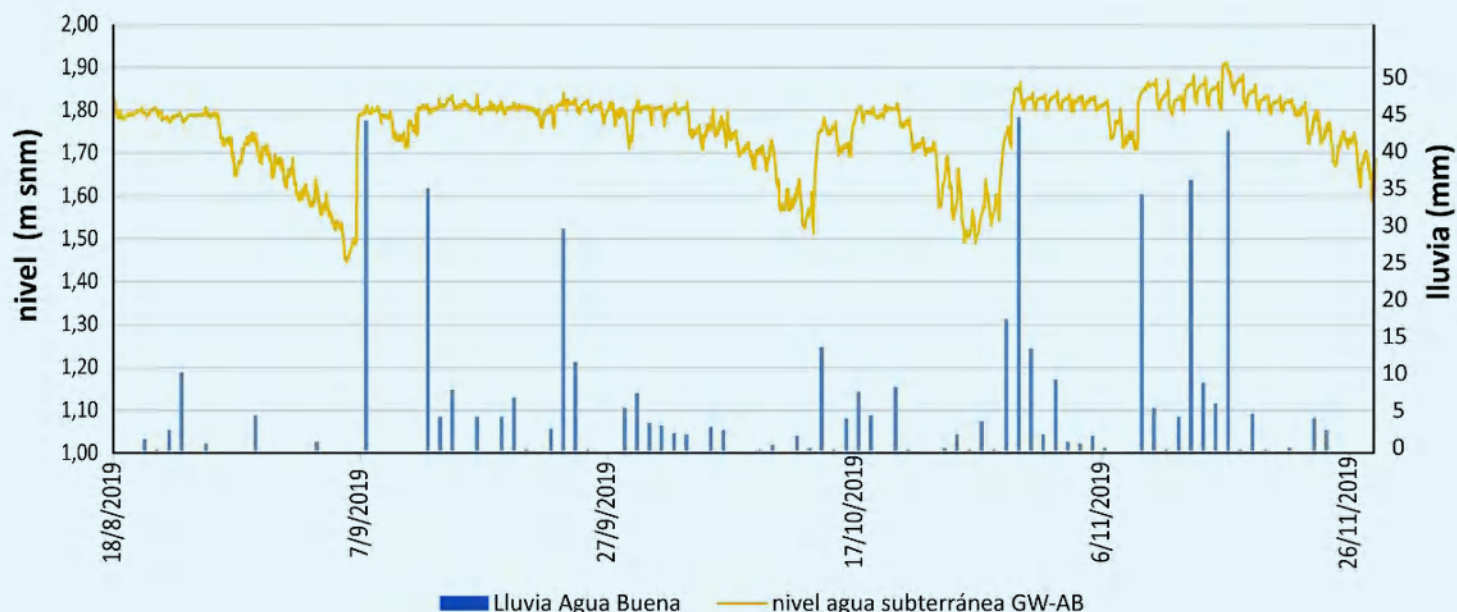
En relación con las precipitaciones, nótese que sólo el sensor de nivel localizado en la planicie registra ascensos luego de eventos de precipitación (p.e 23/09/19 y 13/10/19), indicando la infiltración del agua de lluvia y la consecuente recarga del agua subterránea.

FIGURA 19: Detalle de la figura 18 donde se muestra una comparación de datos de precipitación de la estación Agua Buena, niveles de agua en el río Tuira en Chepigana y niveles de agua subterránea en piezómetros del transecto 2.



Por último, el piezómetro localizado en el área de Agua Buena, en un sector del humedal alejado del cauce del río Tuira, registra claros ascensos en el nivel del agua subterránea asociados a las precipitaciones (Fig. 20). Nótese que estos ascensos ocurren hasta un nivel cercano a 1,8 m snm y disminuyen luego de un periodo en donde o no hay precipitaciones o estas son muy escasas.

FIGURA 20: Comparación de datos de precipitación de la estación Agua Buena y niveles de agua subterránea en Agua Buena (GW-FT3).



D. Características químicas e isotópicas del agua en los distintos ambientes del humedal

El análisis de los datos muestra variaciones en los parámetros físicos y químicos de las muestras de agua superficial y subterránea tomadas en las diferentes áreas de humedales (Tabla 1). La salinidad del agua superficial varía de 3100 ppm en el sector aguas arriba (TR-T1) a 18700 ppm (TR-T2) y 21200 ppm (TE) en el sector aguas abajo. Esto indica que existe un gradiente de salinidad a lo largo del río Tuira, con agua salobre en el sector del transecto 1 y agua salobre-salada en el sector del transecto 2. Por otro lado, el pH registrado indicó valores neutros a levemente alcalinos, y los valores de Eh estuvieron en todos los casos cercanos a 200 mv.

En el transecto 1 (aguas arriba), el agua subterránea en el albardón (GW-T1-1) presenta alta salinidad (8950 ppm), mientras que en la planicie de inundación disminuye a 1960 ppm (GW-T1-3) y 850 ppm (GW-T1-2). En todos

los casos, el pH es ácido con valores entre 4,3 y 4,8, y Eh cercano a 200 mv. En el transecto 2 (aguas abajo), el agua subterránea entre los manglares (GW-T2 1) muestra mayor salinidad (12100 ppm) con pH de 6,6 y Eh de -30 mv. En el sector manglar-alcornoque (GW-T2 2) la salinidad del agua subterránea es levemente menor (9980 ppm), con pH similar, pero con valores de Eh oxidante (183 mv).

Por otro lado, los pequeños arroyos que drenan de Filo del Tallo (muestras SW-FT en la Tabla. 1) presentan valores de salinidad bajos (175 y 185 ppm), de pH entre 6,5 y 7,7 y de Eh oxidante (283mv). Es interesante notar que, aunque las muestras SW-FT1 y SW-FT2 son muy similares, la muestra SW-FT3 (más cercana al río Tuira) tiene una salinidad ligeramente mayor y un pH y Eh más bajos que las otras dos muestras de agua superficial de Filo del Tallo (Tabla1).

MUESTRA	EC (MS/CM)	SALINIDAD (PPM)	PH	EH (MV)	$\delta^{18}O\text{‰}$	$\delta^2H\text{‰}$	Σ REE (PPB)	
AGUA SUBTERRÁNEA	GW-T1-1	13,99	8950	4,8	180	-3,10	-20,0	20,684
	GW-T1-2	1,33	850	4,3	180	-3,70	-26,5	28,010
	GW-T1-3	3,06	1960	4,3	212	-2,80	-18,5	90,413
	GW-T2-1	18,90	12100	6,6	-30	-3,55	-23,5	7,922
	GW-T2-2	15,60	9980	6,7	183	-3,95	-26,0	3,542
AGUA SUPERFICIAL	TR-T1	4,85	3100	7,5	229	-4,05	-24,5	2,617
	TR-T2	29,20	18700	7,0	178	-3,15	-22,5	27,086
	TE	33,10	21200	7,8	214	-1,50	-11,5	28,125
	SW-FT 1	0,27	175	7,4	270	-4,90	-33,0	0,803
	SW-FT 2	0,27	175	7,7	283	-5,45	-36,0	1,404
	SW-FT 3	0,29	185	6,5	231	-5,65	-38,0	1,334

TABLA 1: Parámetros fisicoquímicos medidos in situ y valores isotópicos. La nomenclatura de las muestras se indica en la figura 2.

El gráfico δ^2H vs. $\delta^{18}O$ muestra que, aunque las muestras se ubican próximas a la recta meteórica local, descrita para la costa del Pacífico de Panamá Central (Fig. 21a), existen pequeñas desviaciones. El agua superficial y subterránea en el transecto 2 está particularmente cerca de la línea de mezcla teórica entre las muestras de agua superficial que drenan desde Filo del Tallo (SW-FT) y la muestra de agua del río Tuira cercana al estuario (TE). Esta tendencia de mezcla registrada en los valores isotópicos también se puede ver en el gráfico $\delta^{18}O$ en función de la salinidad (Fig. 21b).

De manera similar, las muestras de agua subterránea del área del transecto 1 tienden a alejarse levemente de la línea meteórica mostrando dos comportamientos en el gráfico $\delta^{18}O$ en función de la salinidad (Fig. 21b). Las muestras tomadas de la planicie

de inundación (GW-T1-2 y GW-T1-3), presentan un ligero enriquecimiento isotópico asociado a leves variaciones en la salinidad, tendencia asociada a los procesos de evaporación previos a la infiltración. En contraste, la muestra del albardón (GW-T1-1) registra un aumento en el valor de salinidad, posiblemente asociado a disolución / alteración de minerales y / o hacia la línea de mezcla de aguas entre el río Tuira (TR-T1) y aguas cercanas al estuario (TE).

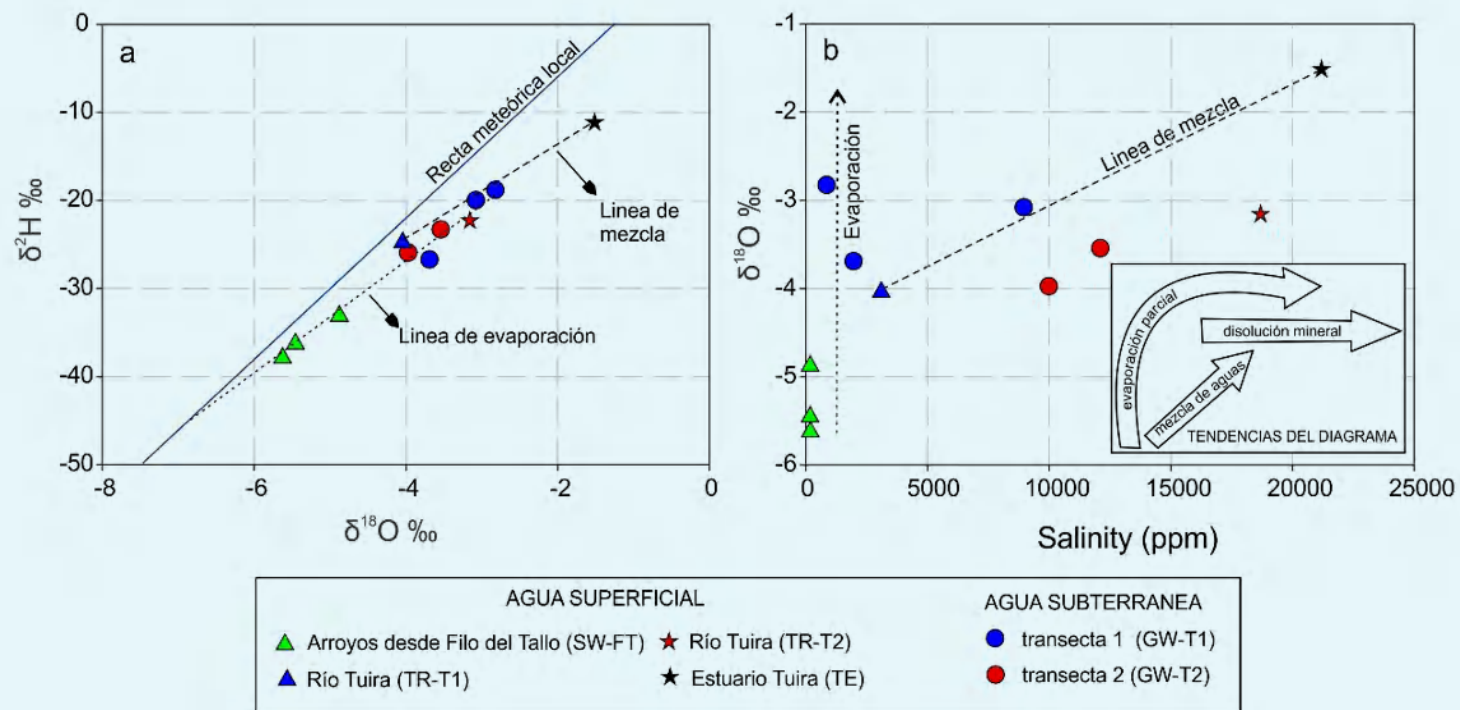


FIGURA 21: (a) valores de $\delta^2\text{H}$ en función de $\delta^{18}\text{O}$, (b) relación entre $\delta^{18}\text{O}$ y la conductividad eléctrica del agua (EC). Local meteoric water line for the Pacific coast of central Panama taken from Kern et al. (2016)

El gráfico de tierras raras (REE) normalizado (Fig. 22) muestra que el agua subterránea en ambas áreas del humedal tiene patrones similares a los del río Tuira. En todos los casos, los patrones son planos y hay una ligera disminución de las REE livianas (del La al Sm). Entre las muestras de agua subterránea, las del sector del transecto 1 tienen mayores contenidos de LREE que las del sector del transecto 2. Por otro lado, el río muestra un aumento en el contenido de REE hacia el estuario (Tabla 1 y Fig. 22).

Se encontraron diferentes patrones y concentraciones de REE en las muestras tomadas de los arroyos que drenan del Filo del Tallo. Estas diferencias también se aprecian en el análisis químico y físico presentado anteriormente (Tabla 1, Fig. 22). Las muestras de SW-FT1 y SW-FT2 muestran patrones con un ligero enriquecimiento de REE pesadas (del Gd al Lu) y marcada anomalía en Eu, mientras que la muestra SW-FT3 presenta aún menos enriquecimiento de REE livianas (del La al Sm).

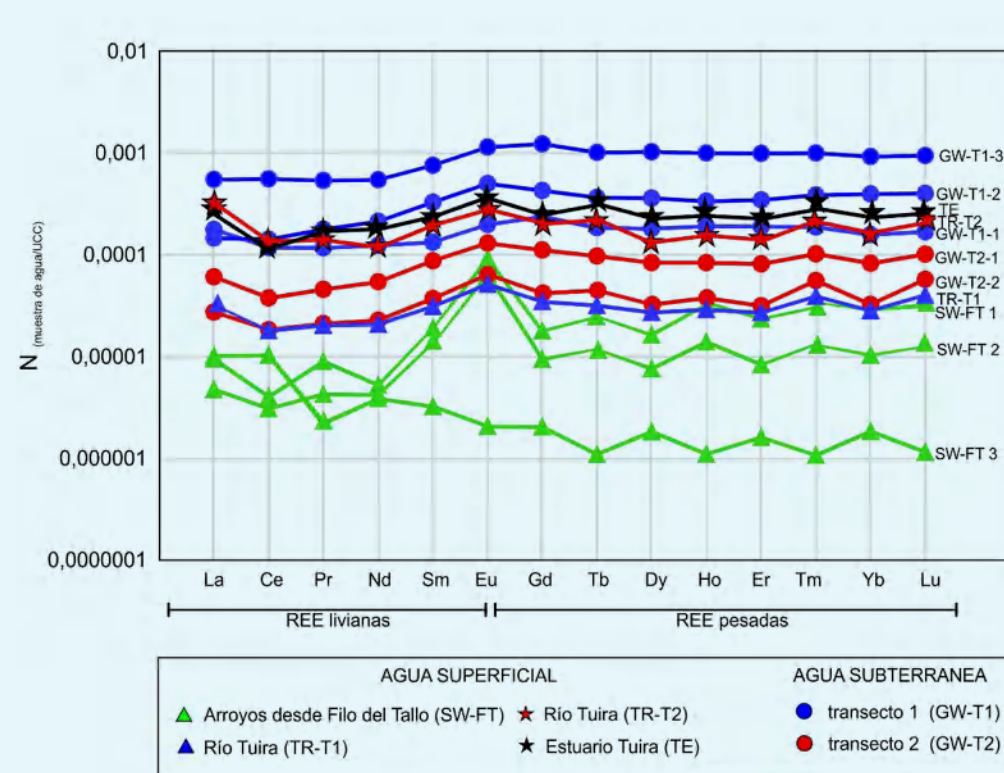


FIGURA 22: Gráfico normalizado de REE para las distintas muestras de agua analizadas.

MODELO CONCEPTUAL DEL FUNCIONAMIENTO HIDROLÓGICO

El estudio en conjunto de los niveles de agua superficiales y subterráneos, datos de lluvias y parámetros químicos e isotópicos en aguas superficiales y subterráneas de los diferentes ambientes geomorfológicos del humedal estudiado, proporciona una comprensión más integrada de los flujos de agua que apoyan las funciones y los servicios ecosistémicos del Matusagaratí.

El río Tuira presenta un régimen fluvial condicionado por el escurrimiento de los excesos de las precipitaciones al que se le superpone un régimen mareal producto de la propagación de la marea del océano Pacífico desde el estuario. Las variaciones intra anuales en el régimen de lluvia condicionan los cambios en los niveles del río y los eventos de inundación.

Por otro lado, la propagación de la marea desde el Golfo de San Miguel hacia aguas arriba del río Tuira alcanza una extensión cercana a los 100 km. Esta propagación de la marea condiciona la dinámica hidrológica en la cuenca media y baja del río y en consecuencia en los humedales asociadas a las mismas. Esta propagación también ocasiona cambios en la salinidad del agua en el río, tal como se observó en los sectores del humedal muestreados donde la salinidad del agua superficial registrada varió de 3100 ppm en el sector aguas arriba (TR-T1) a 18700 ppm (TR-T2) y 21200 ppm (TE) en el sector aguas abajo. Esto indica que existe un gradiente de salinidad a lo largo del río Tuira, con agua salobre en el sector del transecto 1 y agua salobresalada en el sector del transecto 2.

En el área del transecto 1 (Fig. 23), existe un claro intercambio de flujos de agua entre el río y el agua subterránea del albardón el cual está evidenciado por la relación entre los niveles de agua en el río y los niveles de agua subterránea.

Durante las mareas de cuadratura y de sicigias con niveles de pleamar inferiores a 4 – 4,5 m el agua subterránea descarga hacia el río Tuira. En las mareas de sicigia con niveles superiores a 4,5 m el agua del río inunda parcialmente el albardón e infiltra ocasionando un ascenso en los niveles de agua subterránea. Este ingreso del agua del río hacia el agua subterránea si bien puede ocurrir también en las barrancas del río a partir de una propagación lateral de la marea por los sedimentos, es de esperar que debido a la baja permeabilidad de los sedimentos este proceso sólo afecte a una franja estrecha del albardón lindera al río. En contraposición a la baja permeabilidad de los sedimentos, las madrigueras de los cangrejos otorgan a los suelos una permeabilidad secundaria y constituyen vías preferenciales para el ingreso en los sedimentos del albardón (Susilo y Ridd, 2005; Carol et al., 2011).

La infiltración del agua de lluvia constituye también otro aporte al agua subterránea del humedal la cual puede registrarse en los niveles de agua. Si bien no existe un ascenso brusco del nivel freático asociado a las precipitaciones sí se registran leves ascensos en los niveles luego de un periodo de lluvias. Este aporte ocurriría tanto en la zona de albardón como en la de planicie de inundación, no obstante, pese a las importantes lluvias del área es de esperar que la abundante vegetación y la presencia de sedimentos finos

de baja permeabilidad disminuyan la infiltración del agua de lluvia. Este intercambio entre aguas subterráneas y superficiales también se ha informado en ríos similares que tienen albardones boscosos (Santucci et al., 2019).

Los intercambios de flujo entre el agua superficial y el agua subterránea observados en el análisis de los niveles de agua también quedan registrados en la composición química e isotópica del agua. En este sector del humedal el agua del río Tuira tiene una señal isotópica asociada a la línea meteórica local, y los valores de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ del agua subterránea son similares a los del río. Esto muestra que el agua subterránea, que sustenta a los humedales, recibe aportes tanto del río Tuira como de las lluvias.

En las áreas de planicie de inundación, localizadas detrás del albardón, la lluvia se acumula en superficie e infiltra lentamente producto de la mediana a baja permeabilidad de los sedimentos. Esto determina que previo a la infiltración el agua acumulada pueda evaporarse lo que explicaría los ligeros enriquecimientos isotópicos observados en las muestras de agua subterránea de este sector (Clark, 2015). En estas zonas deprimidas, el agua subterránea tiene baja salinidad (menor que la del río), característica que también indica el aporte de las lluvias al agua subterránea que sustenta este sector del humedal.

Por otro lado, el agua subterránea en el albardón presenta contenidos isotópicos como los del río, pero también muestra mayor salinidad (Tabla 1). En esta zona, adyacente al cauce del río, los aportes de agua del río hacia el agua subterránea son más importantes que los derivados de la infiltración del agua de las lluvias. La mayor salinidad en las aguas subterráneas del albardón, la que ocurre sin una variación significativa en el contenido isotópico, refleja procesos de disolución o alteraciones minerales durante la infiltración en la zona no

saturada o en el flujo subterráneo (Clark, 2015). De manera similar, el aumento de la salinidad también podría estar relacionado a procesos de mezcla ya que esta muestra presenta valores isotópicos que pueden atribuirse a una mezcla de agua del río Tuira y agua de estuario. Esto indicaría que el agua que se infiltró en el albardón en la última inundación antes de la fecha de monitoreo corresponde a una composición de mezcla entre la del río y la del estuario. Este mayor aporte de agua del estuario es esperable que ocurra ya que tal como

se observó en la relación de niveles de agua la inundación del albardón ocurre durante las máximas mareas de sicigia periodo en que el ingreso de agua desde el estuario es mayor. De esta manera, el desborde del río determina las características químicas del agua y crean gradientes ambientales en el humedal. Asimismo, como se explicó antes, la inundación contribuye a la acumulación de sedimentos y al transporte y dispersión de semillas y larvas de peces (Koerselman et al., 1990; Chen, 2019).

Los patrones de REE en las muestras de agua subterránea son similares a los del río Tuira. Esto nuevamente corrobora la importancia que tienen las inundaciones producidas por el desborde del río como fuente de recarga de las aguas subterráneas. El pH más bajo en el agua subterránea en comparación con el agua del río se asociaría a la descomposición de la materia orgánica. Estas condiciones de pH ácido facilitan la liberación de REE de los sedimentos al agua subterránea

(Gruau et al., 2004), lo que resulta en concentraciones más altas de REE en el agua subterránea. La figura 24 resume los procesos descritos anteriormente, indicando la interacción entre el agua superficial del río Tuira y el agua subterránea del humedal, los sectores con aportes de las lluvias y los contrastes químicos que existen en cada ambiente del humedal en relación con la salinidad, pH y Eh.



FIGURA 23: (a) Sector del albardón con madrigueras de cangrejos aledaño al pozo GW-T1-1. (b) Detalle de la madriguera de un cangrejo, (c) Vista del albardón desde el cauce del río Tuira indicándose en línea punteada la descarga subterránea desde el albardón hacia el río.



TRANSECTO 1

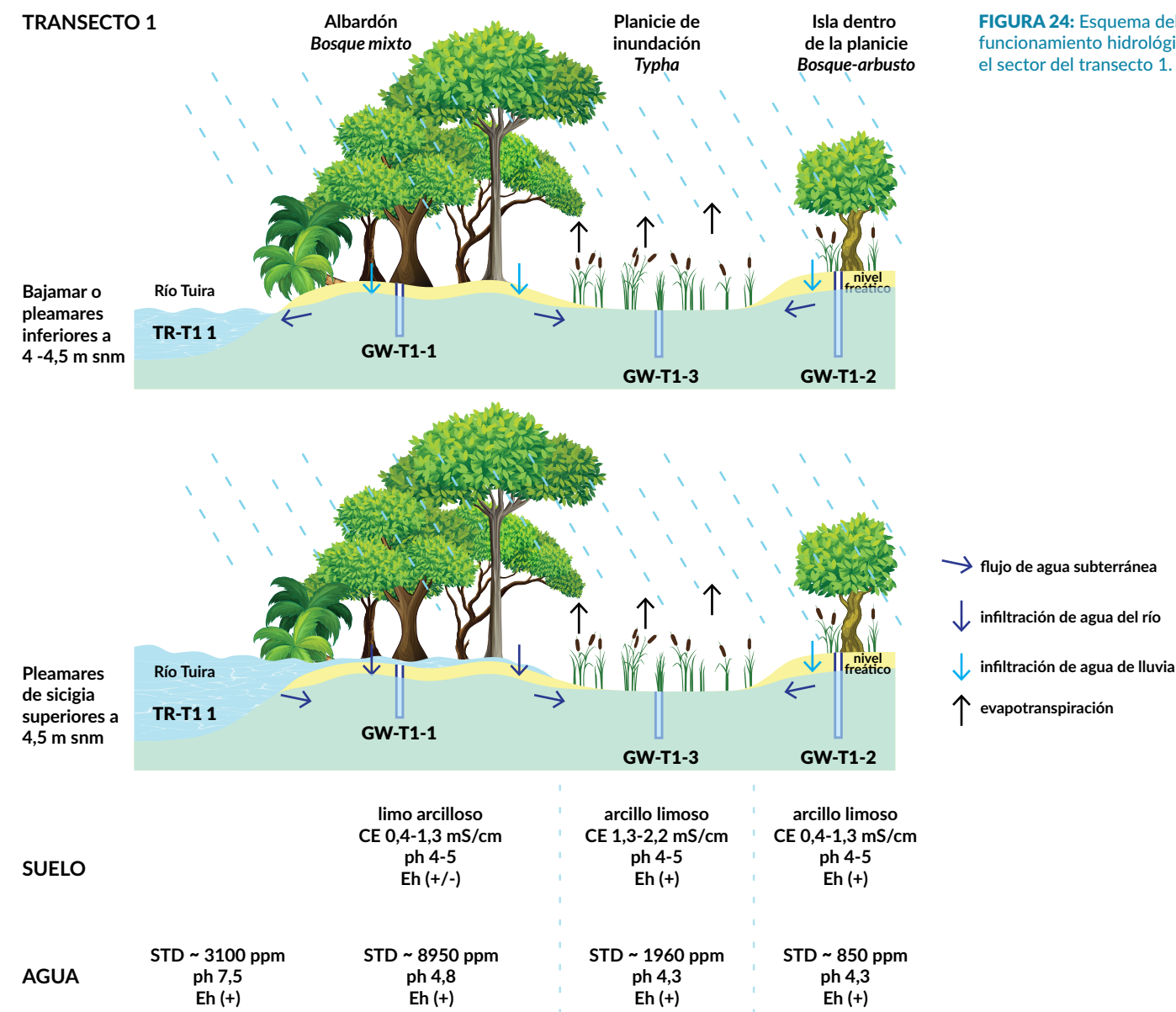
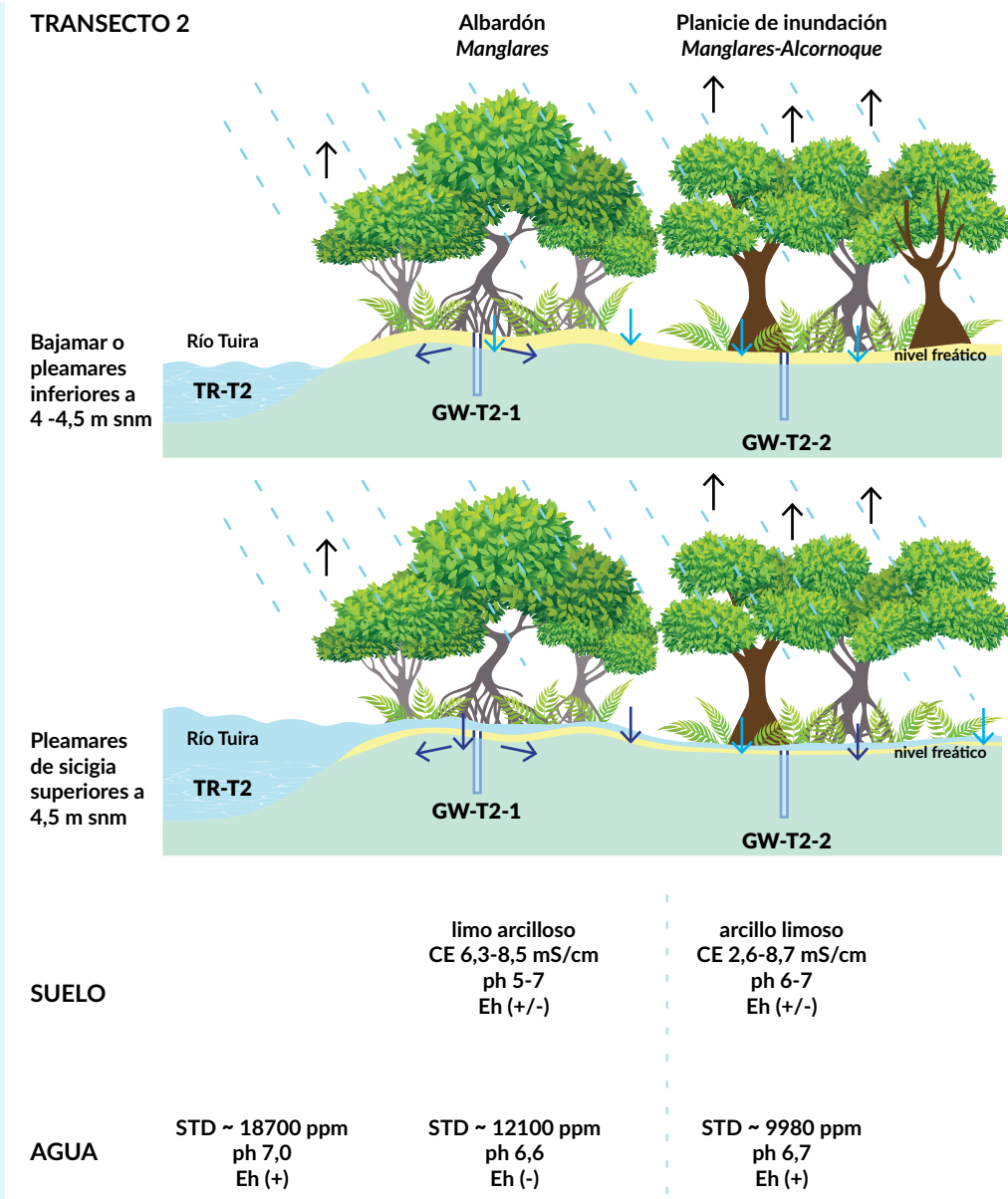


FIGURA 24: Esquema del funcionamiento hidrológico en el sector del transecto 1.

En el área del transecto 2 existe, tanto en la zona de albardón como en la planicie de inundación localizada detrás de éste, intercambio entre los flujos de agua superficial y subterránea. Al igual que como se describió en el transecto 1 durante las mareas de cuadratura y de sicigias con niveles de pleamar inferiores a 4 - 4,5 m el agua subterránea descarga hacia el río Tuira. En las mareas de sicigia con niveles superiores a 4,5 m el agua del río inunda parcialmente el albardón e infiltra ocasionando un ascenso en los niveles de agua subterránea.

Asimismo, el agua del río durante la pleamar también ingresa por los canales de marea que se desarrollan en esta zona del humedal y alcanza las áreas de planicie localizadas detrás del albardón provocando también un ascenso en los niveles de agua subterránea. También aquí la infiltración del agua de la marea se ve favorecida por las numerosas madrigueras de cangrejos. Particularmente en estas áreas de planicie de inundación la infiltración del agua de lluvia es un proceso que también influye en la dinámica del agua subterránea, quedando evidenciado estos aportes en ascensos del nivel freático luego de los eventos de lluvia. El agua que ingresa a esta zona del humedal no solo proviene de la precipitación que ocurre sobre el sector, sino que también puede estar asociada al escurrimiento superficial de las precipitaciones desde las áreas más elevadas adyacentes.

Las características hidrodinámicas descritas se reflejan en la química y señal isotópica del agua. Las muestras de agua subterránea presentan contenidos isotópicos asociados a procesos de mezcla entre el agua superficial que escurre desde Filo del Tallo, con composición similar a la de la lluvia, y la del estuario. Si bien esto indica la existencia de dos fuentes principales de agua, la alta salinidad registrada en el agua subterránea sugiere que la infiltración del agua mareal del río Tuira es la principal fuente de recarga al agua subterránea en esta zona del humedal. Nótese que en este sector del río la salinidad es mucho mayor que la del transecto 1 debido a la propagación del agua de mar desde el estuario.



Esta contribución del río también es evidente en la similitud observada entre los patrones REE del agua subterránea y los del río Tuira. En cuanto al aporte de agua desde Filo del Tallo, es importante considerar que los patrones y concentraciones de REE de estas aguas son muy diferentes a los del agua subterránea. Estos arroyos presentan caudales bajos por lo que su aporte al humedal es limitado y, por tanto, no dejan huella en los patrones REE del agua subterránea. La figura 25 resume los procesos descritos anteriormente indicando la interacción entre agua superficial - agua subterránea, los sectores con aportes de las lluvias y de los arroyos desde Filo del Tallo, así como también los contrastes químicos que existen en cada sector en relación con la salinidad, pH y Eh.

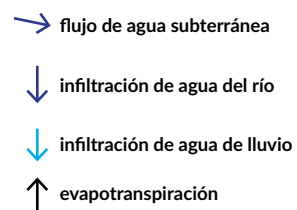


FIGURA 25: Esquema del funcionamiento hidrológico en el sector del transecto 2.

Por último, el piezómetro localizado en el sector de Agua Buena permite mostrar que estos sectores del humedal alejado del cauce del río Tuira tienen una fuerte dependencia del agua de las precipitaciones. En este sector los niveles de agua subterránea están fuertemente asociados a la infiltración del agua de lluvia la cual llega a saturar todo el suelo. En estas condiciones el nivel freático aflora y se produce el escurrimiento del agua en superficie, así como también el encharcamiento en las zonas deprimidas sin drenaje (Fig. 3). Esta característica puede observarse en los registros de niveles freáticos los cuales ascienden hasta un nivel cercano a 1,8 m snm luego del cual se mantienen poco variables aun ocurriendo precipitaciones (Fig. 18).

Los modelos generados muestran el funcionamiento hidrológico del humedal en los distintos sectores y brindan valiosa información que podría utilizarse para el manejo y conservación de

humedales frente a futuras alteraciones hidrológicas producto de intervenciones humanas. Se ha registrado en muchos humedales del mundo que la intervención con terraplenes, acequias y canales de drenaje para la recuperación de tierras para uso agrícola o pastoreo, producen la pérdida y degradación de los mismos (Portnoy y Giblin, 1997; Brinson y Malvárez, 2002; Bruland, 2003; Godet y Thomas, 2013; Carol et al., 2017). Comprender el funcionamiento hidrológico de los humedales permite definir pautas de manejo del uso del suelo y del agua que eviten las alteraciones hidrológicas que puedan afectar los ambientes y servicios ecosistémicos que brindan los humedales.

Los resultados obtenidos en este estudio indican que hay sectores del humedal que dependen del aporte del río Tuira, otros que dependen del agua de lluvia, y otros sectores donde el aporte de agua al humedal es mixto. Si alguna de estas

condiciones cambia por la acción del hombre cambiarán las características ambientales del humedal. Por ejemplo, los sectores del humedal del transecto 2 asociados al albardón del río dependen de los aportes de agua por inundación desde el río y de la presencia de suelos poco drenados reductores. Si estos sectores fueran drenados, sus condiciones hídricas cambiarían de un ambiente reductor a uno oxidante, generando una acidificación irreversible del suelo (Sammut et al. 1996; White et al. 1997; Karimian 2018). Por otro lado, en aquellos sectores de la llanura de inundación, donde los aportes son principalmente agua de lluvia, si se canalizan para drenarlos, estos canales no solo drenarán el exceso de agua secando el humedal, sino que también serán rutas preferenciales para la entrada de agua del río, generando cambios en la salinidad (Moorhead, 1991; Carol et al., 2014).

CONCLUSIONES

Dentro del humedal de Matusagaratí se reconocieron diferentes ambientes asociados a los sectores de albardón y llanuras aluviales del río Tuira, con variaciones dentro de la llanura aluvial dependiendo de la presencia de islas topográficamente más altas y de la proximidad al río. Asimismo, dentro del río Tuira se reconocieron variaciones espaciales en la salinidad como consecuencia de la propagación de la marea desde el estuario. Esta propagación determina que exista en el río Tuira un aumento de la salinidad desde la cuenca media a la cuenca baja, así como también que el nivel del río oscile periódicamente con la marea.

El estudio de los niveles freáticos, niveles de agua en el río Tuira y precipitaciones, apoyados en isótopos estables, permitió identificar diferentes ambientes

dentro del humedal, algunos de los cuales dependen principalmente del aporte de agua del río Tuira, otros del agua de lluvia, y otros donde el aporte de agua es de mezcla. Las relaciones entre el agua superficial y subterránea y los aportes de agua en las distintas zonas estudiadas ponen en evidencia la variabilidad que existe en el funcionamiento hidrológico del humedal de Matusagaratí.

Los resultados reportados en este trabajo brindan datos hidrológicos en sectores no modificados por las actividades antrópicas. Estos datos no solo contribuyen al entendimiento del funcionamiento hidrológico del humedal, sino que también son una valiosa herramienta para generar lineamientos de manejo ante el avance de las actividades antrópicas que afectan algunos sectores del humedal.

REFERENCIAS

Arnaud-Fassetta, G., Astrade, L., Bardou, E., Corbonnois, J., Delahaye, D., Fort, M., ... & Penven, M. J. (2009). Fluvial geomorphology and flood-risk management. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 15(2), 109-128.

Brinson, M. M., Malvárez, A. I. (2002). Temperate freshwater wetlands: types, status, and threats. *Environmental conservation*, 115-133.

Bruland, G. L., Hanchey, M. F., & Richardson, C. J. (2003). Effects of agriculture and wetland restoration on hydrology, soils, and water quality of a Carolina bay complex. *Wetlands Ecology and Management*, 11(3), 141-156.

Bullock, A., & Acreman, M. (2003). The role of wetlands in the hydrological cycle. *Hydrology and Earth System Sciences*, 7(3), 358-389.

Candanedo, I. 2021. Matusagaratí: El Pantanal de Panamá. Resumen para Tomadores de Decisión. Universidad Tecnológica de Panamá. Secretaría Nacional de Ciencia Tecnología e Innovación (SENACYT). 24 páginas. Panamá.

Carol E, M Alvarez, I Candanedo, S Saavedra, M Arcia y A Franco. 2020. Surface water-groundwater interactions in the Matusagaratí wetland, Panamá. *Wetlands Ecology and Management*. 28, 971-982. <https://doi.org/10.1007/s11273-020-09762-9>

Carol, E., Kruse, E., Pousa, J. (2011). Influence of the geologic and geomorphologic characteristics and of crab burrows on the interrelation between surface water and groundwater in an estuarine coastal wetland. *Journal of Hydrology*, 403: 234 - 241.

Carol, E., Braga, F., Donnici, S., Kruse, E., & Tosi, L. (2017). The hydrologic landscape of the Ajó coastal plain, Argentina: An assessment of human-induced changes. *Anthropocene*, 18, 1-14.

Clark, I., 2015. *Groundwater Geochemistry and Isotopes*. CRC Press.

Chen, L. (2019). Invasive plants in coastal wetlands: patterns and mechanisms. In *Wetlands: Ecosystem Services, Restoration and Wise Use* (pp. 97-128). Springer, Cham.

Davranche, M., Grau, G., Dia, A., Le Coz-Bouhnik, M., Marsac, R., Pédrot, M., Pourret, O. (2016). Rare earth elements in wetlands. In *Trace elements in waterlogged soils and sediments* (pp. 135-162). CRC Press Taylor & Francis Group Boca Raton, London, New York.

Godet, L., & Thomas, A. (2013). Three centuries of land cover changes in the largest French Atlantic wetland provide new insights for wetland conservation. *Applied Geography*, 42, 133-139.

Gruau G, Dia A, Olivie-Lauquet G, Davranche M, Pinay G (2004) Controls on the distribution of rare earth 475 elements in shallow groundwaters. *Wat. Res.* 38:3576-3586

Karimian, N., Johnston, S. G., & Burton, E. D. (2018). Iron and sulfur cycling in acid sulfate soil wetlands under dynamic redox conditions: A review. *Chemosphere*, 197, 803-816.

Kern, Z., Harmon, R.S., Fórizs, I. (2016) Stable isotope signatures of seasonal precipitation on the Pacific coast of central Panama. *Isotopes in Environmental and Health Studies* 52: 128-140. doi: 10.1080/10256016.2015.1016021

Kerr S.C., Shafer M.M., Overdier J., Armstrong D.E. (2008) Hydrologic and biogeochemical controls on trace element export from northern Wisconsin wetlands. *Biogeochem.* 89:273-294

Koerselman, W., Claessens, D., ten Den, P., & van Winden, E. (1990). Dynamic hydrochemical and vegetation gradients in fens. *Wetlands Ecology and Management*, 1(2), 73-84.

Piégay, H., Darby, S. E., Mosselman, E., & Surian, N. (2005). A review of techniques available for delimiting the erodible river corridor: a sustainable approach to managing bank erosion. *River research and applications*, 21(7), 773-789.

Portnoy, J. W., & Giblin, A. E. (1997). Biogeochemical effects of seawater restoration to diked salt marshes. *Ecological applications*, 7(3), 1054-1063.

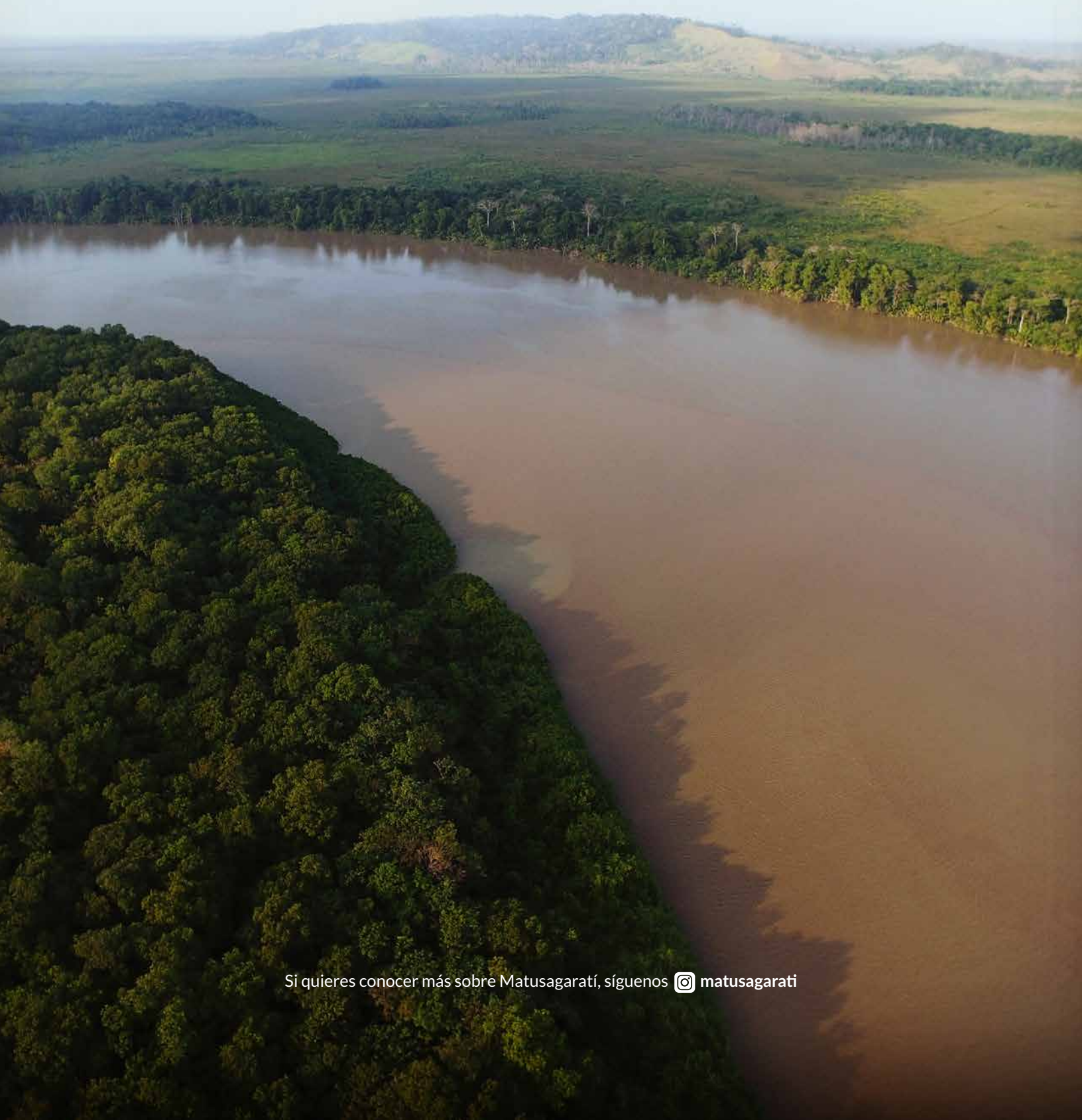
Sammut, J., White, I., & Melville, M. D. (1996). Acidification of an estuarine tributary in eastern Australia due to drainage of acid sulfate soils. *Marine and Freshwater Research*, 47(5), 669-684.


Santucci L., Sanci R., Carol E., Villalba E., Panarello H. 2019. Using H, O, Rn isotopes and hydrometric parameters to assess the surface water-groundwater interaction in coastal wetlands associated to the marginal forest of the Río de la Plata. *Continental Shelf Research* 186, 104 - 110.

Verhoeven, J. T., Arheimer, B., Yin, C., & Hefting, M. M. (2006). Regional and global concerns over wetlands and water quality. *Trends in ecology & evolution*, 21(2), 96-103.

White, I., Melville, M. D., Wilson, B. P., & Sammut, J. (1997). Reducing acidic discharges from coastal wetlands in eastern Australia. *Wetlands Ecology and Management*, 5(1), 55-72.

Winter, T. C. (1999). Relation of streams, lakes, and wetlands to groundwater flow systems. *Hydrogeology Journal*, 7(1), 28-45.



Si quieres conocer más sobre Matusagaratí, síguenos  [matusagarati](https://www.instagram.com/matusagarati)