



Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago
de San Andrés, Providencia y Santa Catalina

**AUNAR ESFUERZOS PARA DESARROLLAR ACTIVIDADES DE
FORTALECIMIENTO DE LA GESTION, EL CONOCIMIENTO Y
LA GOBERNANZA DEL RECURSO HIDRICO DE LA RESERVA
DE BIOSFERA SEAFLOWER, ARCHIPIELAGO DE SAN
ANDRES, PROVIDENCIA Y SANTA CATALINA PULMON DEL
CARIBE INSULAR**

CONVENIO No. CI-SCYOA-379-2024

**INFORME
MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL Y NUMÉRICO**



	FORTALECIMIENTO DE LA GESTION, EL CONOCIMIENTO Y LA GOBERNANZA DEL RECURSO HIDRICO DE LA RESERVA DE BIOSFERA SEAFLOWER, ARCHIPIELAGO DE SAN ANDRES, PROVIDENCIA Y SANTA CATALINA PULMON DEL CARIBE INSULAR	
---	---	--

Formato preliminar al documento

Título	Informe Modelo Hidrogeológico conceptual y numérico
Versión	01
Estado	Documento para revisión por parte del comité de supervisor del contrato.
Autor (es)	Equipo de técnico de ALDESARROLLO
Revisó	

Control de Copias

Versión	Fecha	Responsable	Descripción

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	7
2.	DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	8
3.	RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN SECUNDARIA	9
3.1.	Estudios previos.....	9
3.2.	Inventario e información disponible.....	10
4.	MÓDELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL.....	13
4.1.	Límites hidrogeológicos	13
4.2.	Características geológicas y estructurales	14
4.2.1.	Estratigrafía	14
4.2.2.	Geología estructural.....	16
4.2.3.	Geología local.....	18
4.2.4.	Información geofísica	23
4.3.	Caracterización superficial	27
4.3.1.	Precipitación	27
4.3.2.	Drenajes	33
4.4.	Características hidrodinámicas	34
4.4.1.	Piezometría	34
4.4.2.	Parámetros hidráulicos	50
4.4.3.	Caudales de extracción	54
4.4.4.	Zonas de recarga y descarga.....	57
4.5.	Características hidrogeoquímicas.....	58
4.5.1.	Iones mayoritarios	58
4.5.2.	Intrusión marina.....	59
4.6.	Formulación modelo conceptual	62
5.	MÓDELO HIDROGEOLOGICO NUMERICO.....	64
5.1.	Malla.....	64
5.2.	Condiciones de frontera.....	65
5.2.1.	Flujo.....	66

5.2.2.	Transporte	69
5.3.	Parametrización	70
5.4.	Calibración	72
5.4.1.	Puntos de observación	72
5.4.2.	Calibración estacionaria	74
5.5.	Resultados.....	78
6.	CONCLUSIONES.....	83
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
8.	ANEXOS	87
8.1.	Anexo 1 – Hidrogramas.....	87

INDICE DE FIGURAS

Figura 3-1. Distribución espacial y cantidad información hidrogeológica de la isla	11
Figura 3-2. Distribución Temporal datos	12
Figura 4-1. Esquema limites sistema hidrogeológico San Andrés	13
Figura 4-2. Columna estratigráfica de San Andrés.....	15
Figura 4-3. Distribución espacial unidades geológicas	17
Figura 4-4. Perfil de pozos ubicados en el sector de El Cove (a) y perfil de pozos ubicados en el sector centro oriental (b).	19
Figura 4-5. Perfil de pozos ubicados en el sector centro occidental.....	20
Figura 4-6. Perfil de pozos ubicados en el sector del aeropuerto	21
Figura 4-7. Perfil de pozos ubicados en el sector norte (a) y perfil de pozos ubicados en el sector nororiental (b).	22
Figura 4-8. Tomografías de resistividad eléctrica y polarización inducida en San Andrés. 24	
Figura 4-9. Tomografía de resistividad eléctrica en el sector de El Cove, San Andrés.	25
Figura 4-10. Tomografías de resistividad eléctrica (a) y perfiles de polarización inducida (b) en El Cove. Tomado y modificado de Findeter & Smith (2015)	26
Figura 4-11 Localización estaciones climatológicas, particularmente registros precipitación.	28
Figura 4-12. Precipitación Anual y Mensual para el archipiélago de San Andrés y Providencia	29
Figura 4-13. Resultado prueba Mann-Kendall	31
Figura 4-14. Precipitación diaria sin rellenar	32
Figura 4-15 Distribución mensual multianual de la precipitación.	33
Figura 4-16 Serie mensual de precipitación 1990-2024 de San Andrés Isla.....	33
Figura 4-17. Distribución espacial y temporal datos de niveles.....	34
Figura 4-18. Ejemplo histograma	35
Figura 4-19. Histogramas escala anual por UPI.....	40
Figura 4-20. Histogramas para el área de Cove: P8, P10 P7 y P3	41
Figura 4-21. Histogramas para Aeropuerto: PC18, Pozo A, PD desalinizadora y Pozo D ..	43
Figura 4-22. Histogramas para Haines Bright: PC17, PC20, PC4 y PC11	44
Figura 4-23. Histogramas para el área del centro: PC26, PC14, PC27 y PC8	45
.Figura 4-24. Histogramas para otras zonas: PC65, PC25, PC7 y PC35.....	46
Figura 4-25. Propagación de mareas piezómetros San Andrés	47
Figura 4-26. Isopiezas y carga hidráulica San Andrés 2018	49
Figura 4-27. 3D superficie piezometría vs superficie topográfica e histograma de cargas..	50
Figura 4-28. Perfil de pozos con información de ranurado.	51
Figura 4-29. Diagrama de caja de conductividad hidráulica	52
Figura 4-30. Distribución espacial de los valores conductividad hidráulica	53
Figura 4-31. Perfil de pozos con información de ranurado.	54
Figura 4-32. Caudales de extracción – información histórica	56
Figura 4-33. Gráfico de caudales de extracción – información histórica	57
Figura 4-34. Diagramas de Piper año 1999-2001 y 2016.....	58
Figura 4-35. Distribución espacial 2D conductividad eléctrica	59
Figura 4-36. Distribución espacial 2D conductividad eléctrica	60

Figura 4-37. Distribución espacial 3D esquemática	61
Figura 4-38. Síntesis Modelo Hidrogeológico Conceptual	63
Figura 5-1 Enmallado 2D y Sección AA'	64
Figura 5-2. Configuración malla 3D del modelo hidrogeológico numérico	65
Figura 5-3. Condiciones de frontera flujo del modelo hidrogeológico numérico	66
Figura 5-4. Pozos de bombeo modelo numérico – <i>Izquierda:Inventario funias (2018), derecha: implementación modelo numérico Feflow.</i>	67
Figura 5-5. Recarga calibrada – modelo hidrogeológico numérico	68
Figura 5-6. Condiciones de frontera Transporte del modelo hidrogeológico numérico	69
Figura 5-7. Parametrización unidades geológicas	70
Figura 5-8. Parametrización formación San Luis	71
Figura 5-9. Pozos de observación – modelo hidrogeológico numérico	73
Figura 5-10. Relación salinidad conductividad eléctrica San Andrés	74
Figura 5-11. Zonas de parámetros modelo hidrogeológico numérico.....	75
Figura 5-12. Carga Hidráulica Simulada vs Observada – Calibración estacionaria	76
Figura 5-13. Concentración Salinida Simulada vs Observada – Calibración estacionaria ..	77
Figura 5-14. Resultados Carga hidráulica – velocidad Darcy	79
Figura 5-15. Resultados balance flujo y transporte	79
Figura 5-16. Resultados MHN Carga hidráulica - Salinidad.....	82

INDICE DE TABLAS

Tabla 4.1. Variación de la profundidad aproximada de la zona de mezcla en 4 pozos.....	26
Tabla 4-1. Variación de la profundidad aproximada de la zona de mezcla en 4 pozos.	26
Tabla 4-2. Estaciones climatológicas Isla San Andrés origen IDEAM.....	30
Tabla 4-3. Estaciones climatológicas San Andrés Isla origen IDEAM.....	30
Tabla 4-4. Estadísticas básicas series de precipitación 1991-2024	31
Tabla 4-5. Pozos con registros de niveles piezométricos	35
Tabla 4-6. Pozos concesionados por Coralina 2024.....	55
Tabla 4-7. Recarga calculada por diferentes trabajos en San Andres	57
Tabla 5-1. Parámetros Ajustados – Calibración Estacionaria	78
Tabla 5-2. Parámetros para clasificar tipo de agua según salinidad según USGS	80

1. INTRODUCCIÓN

La isla de San Andrés constituye un caso emblemático para el estudio de la intrusión marina, dado que el acceso al agua dulce depende principalmente de la explotación de aguas subterráneas, complementada en menor medida por la desalinización. La isla enfrenta importantes desafíos en términos de sostenibilidad ambiental y manejo de recursos hídricos, debido a su limitada extensión, su dependencia de las aguas subterráneas y la creciente presión mayor demanda del recurso.

De acuerdo con lo anterior, Coralina ha optado por la optimización de la gestión del conocimiento y la información sobre los recursos hídricos en la isla de San Andrés, en el marco del proyecto **“Mejoramiento de la Capacidad de Gestión y Manejo del Recurso Hídrico para la Gobernanza del Agua en la Isla de San Andrés”**. Dentro de los objetivos estratégicos de este proyecto se incluyen:

- a. Actualizar los estudios hidrogeológicos de los acuíferos en la isla de San Andrés.
- b. Actualizar la cartografía ambiental para evaluar los efectos del cambio climático y la variabilidad climática en los acuíferos.
- c. Fortalecer las herramientas digitales para la medición, análisis y consulta de datos hídricos, mediante la construcción de un geovisor.
- d. Ampliar el conocimiento y el uso de herramientas tecnológicas para la gestión integral del recurso hídrico, a través de capacitaciones y talleres.

En este contexto, el presente documento se enmarca en el objetivo (a) y describe el proceso de construcción del **modelo hidrogeológico conceptual y numérico** de la isla de San Andrés. Este modelo proporciona una representación esquemática y simplificada de los principales procesos hidrogeológicos que tienen lugar en el área de estudio.

Además, el documento detalla la información secundaria suministrada por Coralina, la cual constituye la base para la caracterización hidrogeológica y la estructuración del modelo conceptual y numérico.

	FORTALECIMIENTO DE LA GESTION, EL CONOCIMIENTO Y LA GOBERNANZA DEL RECURSO HIDRICO DE LA RESERVA DE BIOSFERA SEAFLOWER, ARCHIPIELAGO DE SAN ANDRES, PROVIDENCIA Y SANTA CATALINA PULMON DEL CARIBE INSULAR	 Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina
--	---	--

2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

San Andrés es una isla oceánica con una extensión de 25 km², separada de la plataforma más cercana por profundidades superiores a los 1000 m, tanto la isla como la plataforma circundante son de origen fundamentalmente coralino (Díaz et al., 1995). También, es la isla más grande del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, que se encuentra en el sur oeste del mar caribe.

La isla presenta en la parte norte, el casco urbano con una zona hotelera y comercial. Los barrios de los pobladores nativos se extienden longitudinalmente siguiendo las cimas de la zona colinada.

La isla cuenta 2 centros de producción de agua potable, una planta desalizadora de 50 lps ubicada en el Sector de Lox Bight, desde donde se abastece la zona urbana de la isla y una planta de ablandamiento ubicada en el Sector de Duppy Gully que trata el agua que se capta de 13 pozos concesionados y abastece la zona rural. (Veolia,2023)

3. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN SECUNDARIA

La construcción y el análisis del modelo hidrogeológico conceptual y numérico de la isla de San Andrés se basa en información secundaria recopilada a partir de estudios previos y del inventario de puntos de monitoreo. Esta información ha sido validada mediante análisis técnicos y comparaciones con registros históricos, garantizando su confiabilidad y coherencia con las condiciones hidrogeológicas de la isla.

A continuación, se detalla la información secundaria recopilada.

3.1. Estudios previos

Los estudios previos incluyen informes y datos recopilados a lo largo del tiempo, que aportan información geológica e hidrogeológica clave para la isla de San Andrés. En este capítulo se destacan los más relevantes, otros estudios serán citados en los capítulos correspondientes para complementar el análisis.

A continuación, se presenta una síntesis de cada estudio:

- ***Raasveldt (1955) Primer mapa fotogeológico de las islas de San Andrés y Providencia:*** En este estudio se analizan fotografías aéreas a escala 1:20.000 y se identifican dos unidades, sedimentos miocenos con gran número de escarpes y buzamientos hacia el este que afloran en la parte central de San Andrés y las otras formaciones cuaternarias.
- ***Hubach (1956) artículo sobre la geología de la isla de San Andrés:*** distingue en esta isla tres unidades estratigráficas que son 1. La formación calcárea de San Andrés que corresponde a los sedimentos del cordón interior de la isla y que es de edad miocena; La formación de la Plataforma Terrestre, ligeramente soleantada, que se considera subreciente hasta pleistocena y que constituye los planos bajos de la isla y de los cayos; y la formación de la Plataforma Marina, reciente hasta subreciente.
- ***Burlg (1959) Contribución a la estratigrafía y litogénesis de la Isla de San Andrés:*** Este trabajo comprende un análisis de los moluscos y foraminíferos con el propósito de determinar la edad de las formaciones geológicas y su relación estratigráfica. Se plantea la hipótesis del levantamiento progresivo de la isla de San Andrés.
- ***Ingeominas (1993) Estudio del Acuífero de San Andrés y recuperación del Campo de Pozos. Informe “Hidrogeología de la Isla de San Andrés”:*** Este trabajo representa un estudio integral de la isla desde el punto de vista hidrogeológico. Incluye el registro de un primer inventario de puntos, la elaboración de columnas estratigráficas, la aplicación de métodos geofísicos, hidroquímica, pruebas de bombeo y el planteamiento del primer modelo hidrogeológico numérico de la isla, desarrollado utilizando el código GRWf-SALT.
- ***Ingeominas (1997) Evaluación del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas en la isla de San Andrés:*** Este estudio evalúa el riesgo por

contaminación en la isla de San Andrés mediante una red de 17 piezómetros, basada en información previa. Incluye resultados de perforación, construcción y columnas litológicas de la red sur para monitoreo de calidad.

- **Ingeominas (1998) Plan de manejo del campo de pozos del acueducto de San Andrés:** Este estudio presenta el diagnóstico, mantenimiento y recuperación del campo de pozos del acueducto. Incluye la realización de pruebas de limpieza y recuperación, así como la evaluación de la utilidad de los pozos y la determinación del sellamiento de algunos de ellos.
- **Cuervo (2004) Plan de manejo del campo de pozos del acueducto de San Andrés:** Este estudio presenta la geología regional y estructural de la isla, es la base de la mayoría de los mapas geológicos a la fecha.
- **Osorio (2005) Instructivo para el manejo de las bases de datos sobre el instrumento de la concesión de aguas subterráneas:** Este instructivo presenta la guía base para el seguimiento de los pozos concesionados en la isla a cargo de Coralina y el cual se mantiene hasta la fecha.
- **Unal (2010) Modelación del acuífero San Andrés Islas bajo escenarios de Cambio Climático y Usos del recurso, Proyecto INAP-Colombia:** Se presenta la formulación del modelo hidrogeológico conceptual con información geológica, geofísica, inventarios, caracterizaciones hidráulicas, hidrogeoquímica, todo enfocado para el modelo hidrogeológico numérico implementado en MODFLOW de la totalidad de la Isla.
- **Findeter & Smith (2015) Plan director del recurso hídrico de San Andres-PDRH:** En su producto 3, este trabajo presenta la base ambiental más actual en temas hidrogeológicos, enfocándose en la recopilación de información geológica, geofísica, inventarios, caracterizaciones hidráulicas, hidrogeoquímica y el desarrollo de un modelo numérico.

3.2. Inventario e información disponible

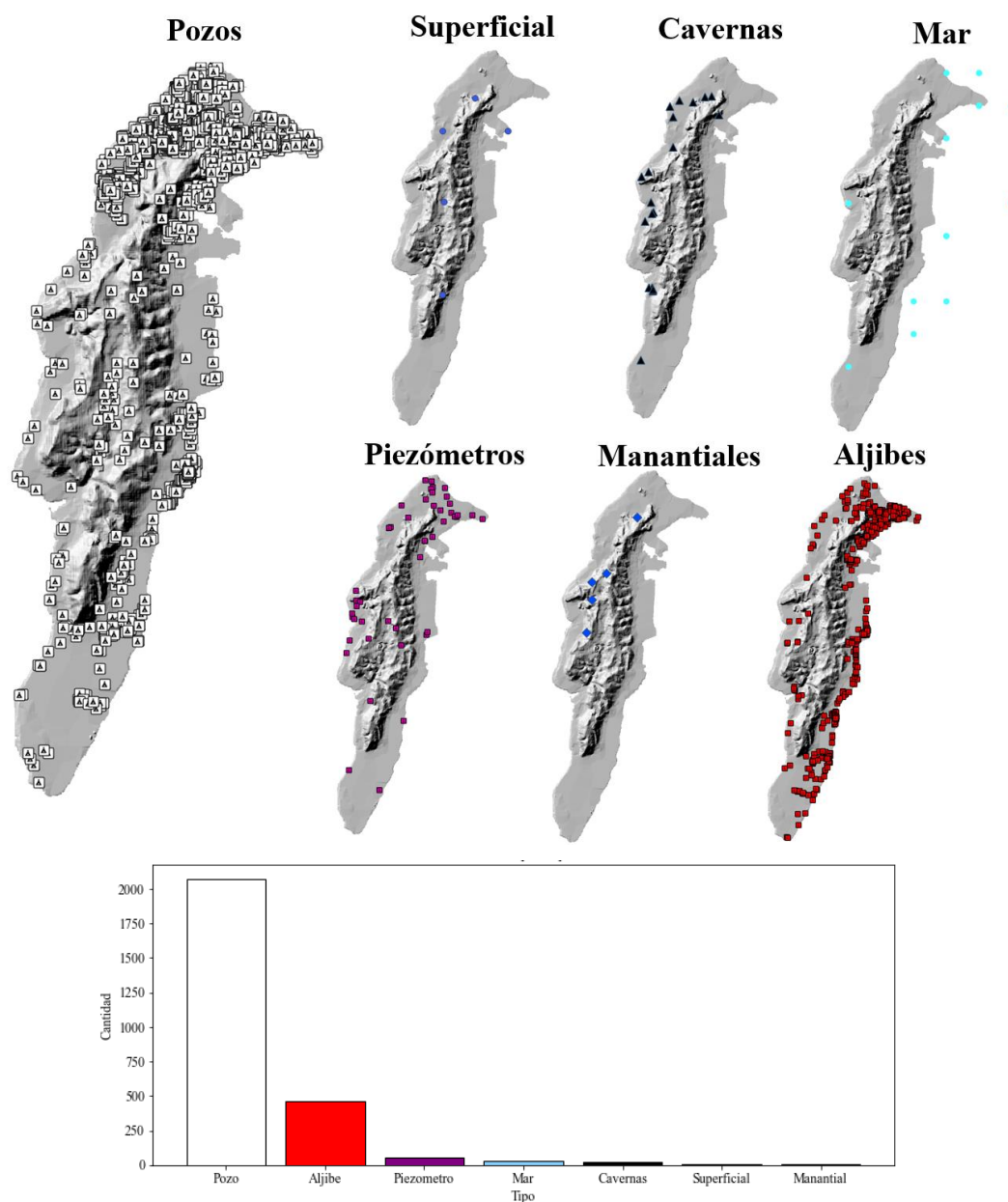
El inventario de puntos de agua es una base fundamental para cualquier estudio de gestión hídrica, ya que permite analizar, tanto espacial como temporalmente, las variables que conforman el sistema hidrogeológico. Este inventario se complementa con informes de estudios previos y dos fuentes de información clave: el **inventario de puntos con formato FUNIAS** entre 2017 y 2018, y el **monitoreo continuo que CORALINA** lleva a cabo en los pozos concesionados bajo su jurisdicción, así como en la red de piezómetros de Red Cove, Red INAP y Red Norte.

Adicionalmente, se han registrado parámetros de conductividad eléctrica en boyas marinas a través del Sistema de Información Ambiental Marino para Colombia (SIAM) del INVEMAR. Por último, las cavernas reportadas en la zona son de gran importancia, ya que reflejan el comportamiento kárstico de la isla.

Con la información existente en la zona existe el registro de pozos (2,071), reflejando su importancia como principal fuente de agua subterránea, seguidos por los aljibes (463), que cumplen un rol importante en el almacenamiento. Los piezómetros (53) permiten o

permitieron el monitoreo del nivel freático, mientras que los registros de mar (27), cavernas (19), manantiales (5) y captaciones superficiales (7) evidencian el esfuerzo de estudio por estudiar los agentes que influyen el medio subterráneo. A. continuación, se presenta la Figura 3-1 con el resumen de la distribución espacial de estos puntos.

Figura 3-1. Distribución espacial y cantidad información hidrogeológica de la isla



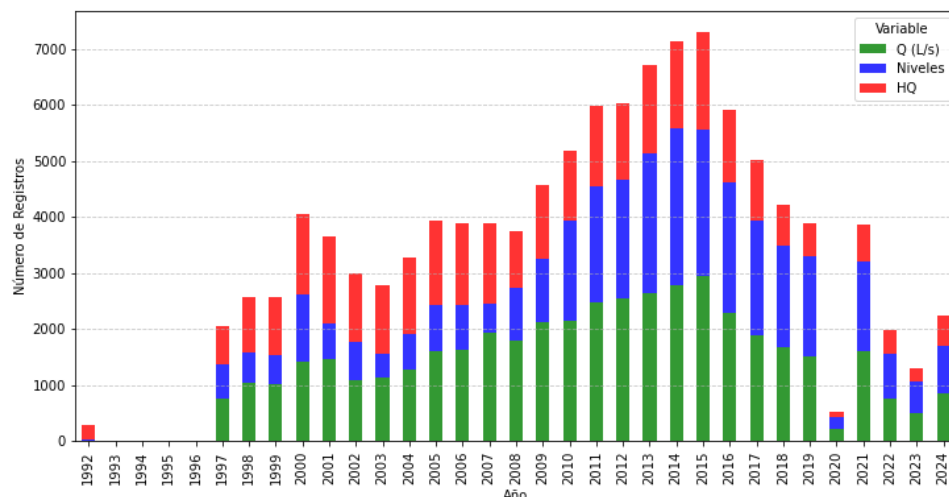
Fuente: Modificado de datos de Coralina, FUNIAS, POT 2014 San Andrés

Es importante señalar que en el estudio de la UNAL (2010) se menciona lo siguiente: “Existen también en la isla alrededor de **6.035 aljibes y pozos barrenados**”. Esta cifra representa aproximadamente un tercio del total reportado en el inventario de FUNIAS. No obstante, la trazabilidad de dicha información es limitada, ya que no se especifica la fuente del inventario mencionado.

Este esfuerzo por monitorear el recurso hídrico está enfocado principalmente en la medición de niveles piezométricos, registro de caudales de extracción en pozos concesionados, registro de parámetros fisicoquímicos básicos o de campo como son: conductividad eléctrica, salinidad, Solidos Disueltos Totales (TDS) y temperatura del sistema hidrogeológico.

A partir de esta informa se logra evaluar en número de datos registrados en el tiempo, como se presenta en la Figura 3-2. Se observa que existe un importante esfuerzo por parte de CORALINA de monitorear el recurso desde el 1997, donde tuvo su máximo de datos en 2015, el declive se da en función de la terminación de la concesión de varios de los pozos, Regulado por la expedición de las resoluciones 693 de 2014 y 182 de 2020 por parte de Coralina, donde se suspendió el otorgamiento de nuevas concesiones de agua subterránea con el objetivo de mejorar la gestión del acuífero. La primera de ellas se expidió en atención a la proyección del niño 2015-2016 y la segunda debido a las proyecciones de disminución de ppt entregadas en la tercera comunicación de cambio climático. También, en el 2020 se observa el impacto de la pandemia COVID19. Es importante resaltar, que estos datos representan la base para la evaluación temporal de las características hidrodinámicas del medio que se realizó para la formulación del modelo conceptual.

Figura 3-2. Distribución Temporal datos



Fuente: Modificado de datos de Coralina, FUNIAS, POT 2014 San Andrés

Finalmente, es importante destacar que el análisis se desarrolla en un medio tridimensional, donde el conocimiento en profundidad de diversas variables y parámetros es fundamental. En este contexto, la información sobre los diseños de los pozos resulta

clave; sin embargo, aunque dicha información es amplia, no es completa, lo que representa una limitante significativa para el desarrollo del análisis hidrogeológico.

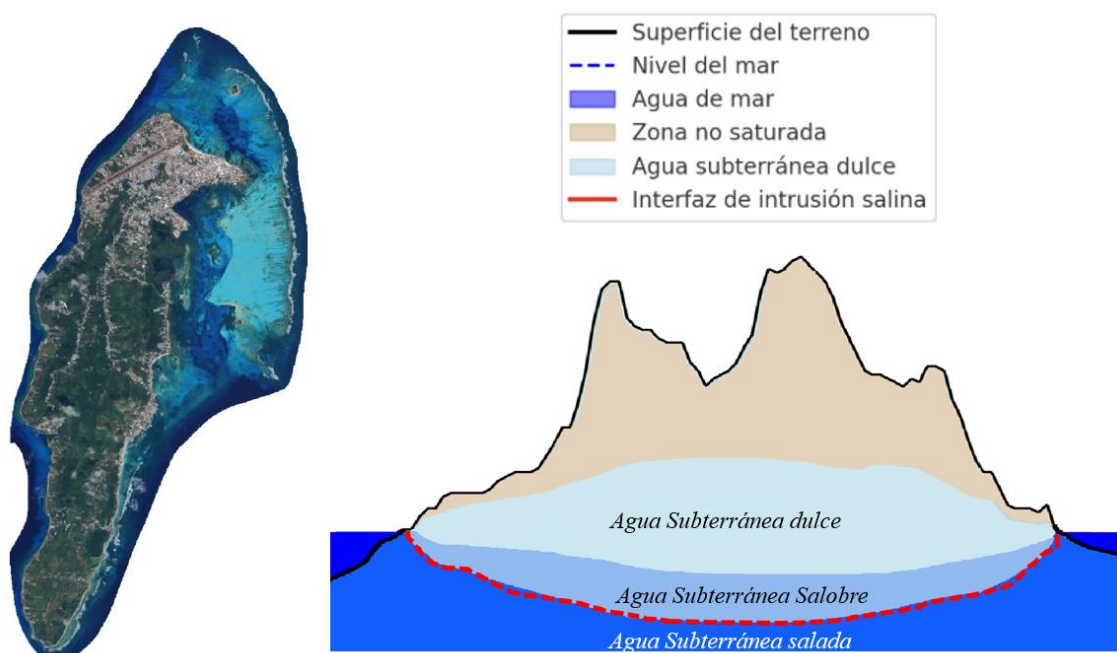
4. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

En este capítulo se desarrolla el modelo hidrogeológico conceptual a partir de la integración de información secundaria, abarcando aspectos geológicos, hidrodinámicos, hidrogeoquímicos y superficiales a escala regional. Esta síntesis permite comprender el funcionamiento del sistema hidrogeológico y establecer las bases para su evaluación integral.

4.1.Límites hidrogeológicos

Los límites del sistema hidrogeológico están definidos por la línea de costa, donde la diferencia de densidad entre el agua subterránea y el agua de mar establece una barrera natural (Huguett, 1989). En profundidad, el sistema está delimitado por la interfaz de la intrusión salina, determinada por criterios de calidad del agua para su uso humano. Dado que se trata de un sistema dinámico, esta interfaz no es estática, sino que varía en el tiempo en respuesta a factores como la recarga, la extracción de agua subterránea y las condiciones hidrogeológicas locales. La esquematización de los límites se presentan en la Figura 4-1.

Figura 4-1. Esquema límites sistema hidrogeológico San Andrés



Fuente: Elaboración propia

4.2. Características geológicas y estructurales

La caracterización geológica está basada en la estratigrafía, geología estructural y litología local de la zona. La importancia de conocer la distribución de los materiales del subsuelo se interpreta en diferentes escalas y define el flujo de agua en el sistema hidrogeológico.

4.2.1. Estratigrafía

En la isla de San Andrés, Ingeominas (1993) reconoció una sedimentación netamente calcárea marina de edad terciaria, donde separó dos unidades que presentan contactos discordantes entre sí, formación San Andrés y formación San Luis. Adicionalmente se clasificaron depósitos cuaternarios representados por depósitos de origen lacustre, depósitos asociados a zonas de manglar y depósitos de vertientes como coluviones y derrubios.

4.2.1.1. Formación San Andrés

Vargas (2004) describe la formación como una secuencia de calizas microcristalinas esparíticas de origen químico, calizas arenosas y calizas lodosas de origen detrítico y químico, con sectores de calizas ricas en fósiles bien conservados (coquinas). En su trabajo divide esta formación en tres unidades:

- Tsac: calizas microcristalinas biomícras y bioesparitas de textura microgranular fina a media y afanítica, de color crema, muy duras y con superficies de disolución en capas masivas muy gruesas.
- Tsal: calizas detríticas arcillosas, muy fosilíferas, formando coquinas de color blanco, crema y amarillas, blandas, meteorizadas en capas delgadas a medias y con intercalaciones de calizas arenosas
- Tsar: calizas detríticas arenosas de grano grueso a medio compuestas por cristales de esparita, restos de fósiles y fragmentos líticos de calizas cristalinas y calizas arenosas lodosas soportadas en una matriz de arcilla y lodo calcáreo.

La edad de la Formación San Andrés ha sido establecida paleontológicamente como Mioceno Medio a Superior Burgl (1959) y corroborada por Díaz et al (2010).

4.2.1.2. Formación San Luis

Según Vargas (2004) la Formación San Luis se encuentra constituida predominantemente por calizas cristalinas coralinas y localmente en las zonas de transición continental a marina por areniscas calcáreas de grano grueso. Las calizas coralinas presentan texturas cristalinas gruesas, con estructuras biogenéticas tabulares dispuestas radial y concéntricamente.

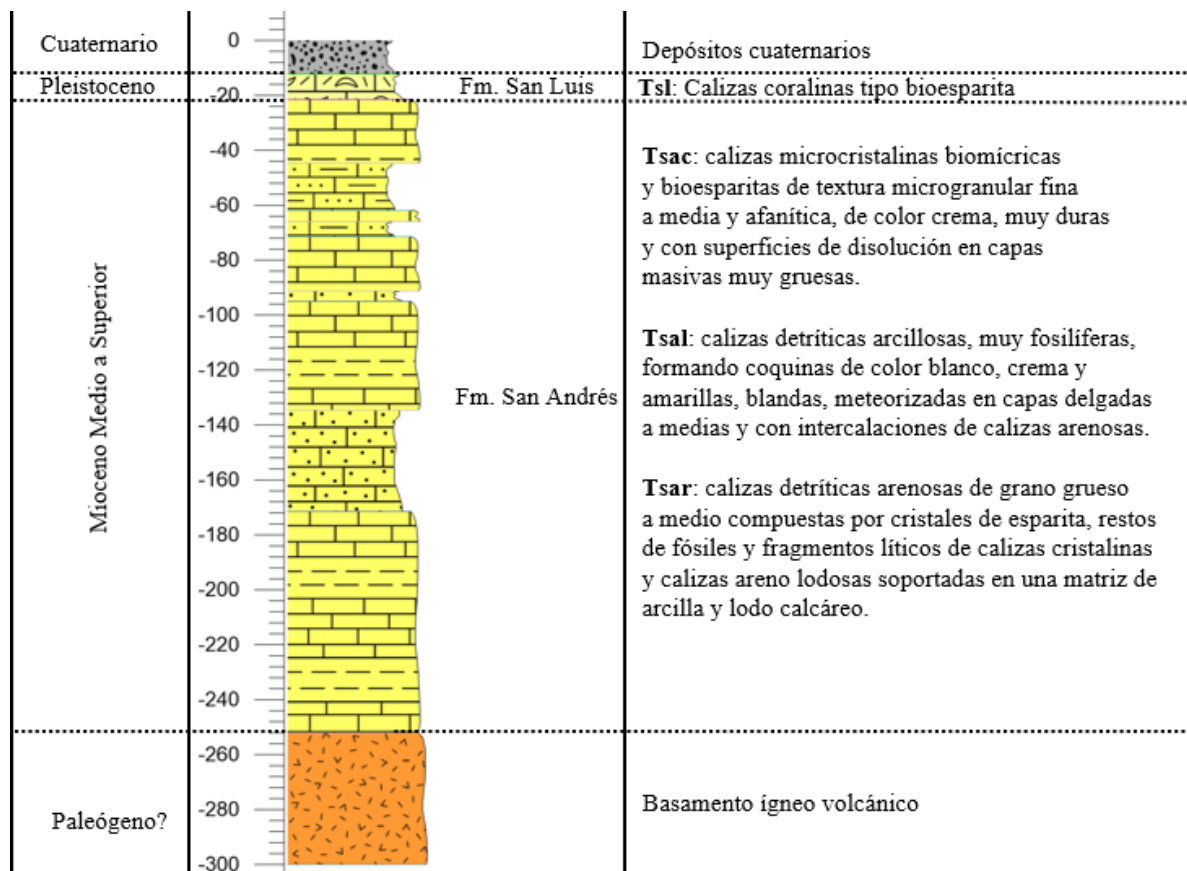
Geister (1975) situó la edad absoluta de las calizas superficiales del Pleistoceno de San Andrés en una edad cercana a los 100,000 años para la plataforma litoral emergida.

4.2.1.3. Depósitos cuaternarios no consolidados

En general en la Isla de San Andrés se presentan una gran diversidad de depósitos no consolidados que fueron definidos por su origen, composición y espesor. Entre estos depósitos se tienen los de origen antrópico como los rellenos sanitarios y rellenos hidráulicos y los geológicos naturales definidos según su ambiente de deposición en depósitos de arenas de playa, depósitos de laderas, depósitos de zonas lacustres y depósitos de manglares.

La Figura 4-2 contiene la columna estratigráfica simplificada de San Andrés, en ella se refleja el origen ígneo de plataforma oceánica y su evolución en un ambiente tropical marino; las rocas carbonatadas dominan la geología de la isla, con depósitos sedimentarios más recientes en la superficie.

Figura 4-2. Columna estratigráfica de San Andrés.



Fuente: Modificado de Unal, 2010; Ingeominas 1997, PROTECNO, 2020

4.2.2. Geología estructural

La isla se puede dividir en dos provincias estructurales separadas por la Falla de San Andrés, el bloque norte presenta buzamientos hacia el este que están entre los 20° y 40°, donde no se identifican fallas o pliegues de importancia. Por su lado, el bloque sur se divide longitudinalmente por la falla del Cove, su lado oriental presenta buzamientos en su mayoría hacia el este y su lado occidental no presenta pliegues o fallas. (Ramírez & Vargas, 2018)

4.2.2.1. Falla de San Andrés

Es una estructura localizada en el costado noroeste de la isla en su zona colinada, se caracteriza por ser rectilínea, tener un contraste morfológico, la formación de silletas de falla (generalmente en el sector de Perry Hill), zonas de cizallamiento, espejos de falla, estrías de falla (en el sector del colegio Bolivariano ubicado en la isla) y zonas de alto fracturamiento en los escarpes rocosos (en el sector del Clif y el Cove). (Vargas-Cuervo, 2004)

Esta falla, por otro lado, afecta las rocas calcáreas del Mioceno de la Formación San Andrés, su orientación es de N45°E, su extensión es de aproximadamente 4 Km, se considera que es una falla de tipo normal y su plano de falla está inclinado hacia el este; además, hay actividad tectónica que se asocia a esta. La zona de falla se caracteriza también por ser una zona de recarga y acuíferos que se encuentran bajo las rocas de la Formación San Luis, en la zona norte de la isla.

4.2.2.2. Falla El Cove

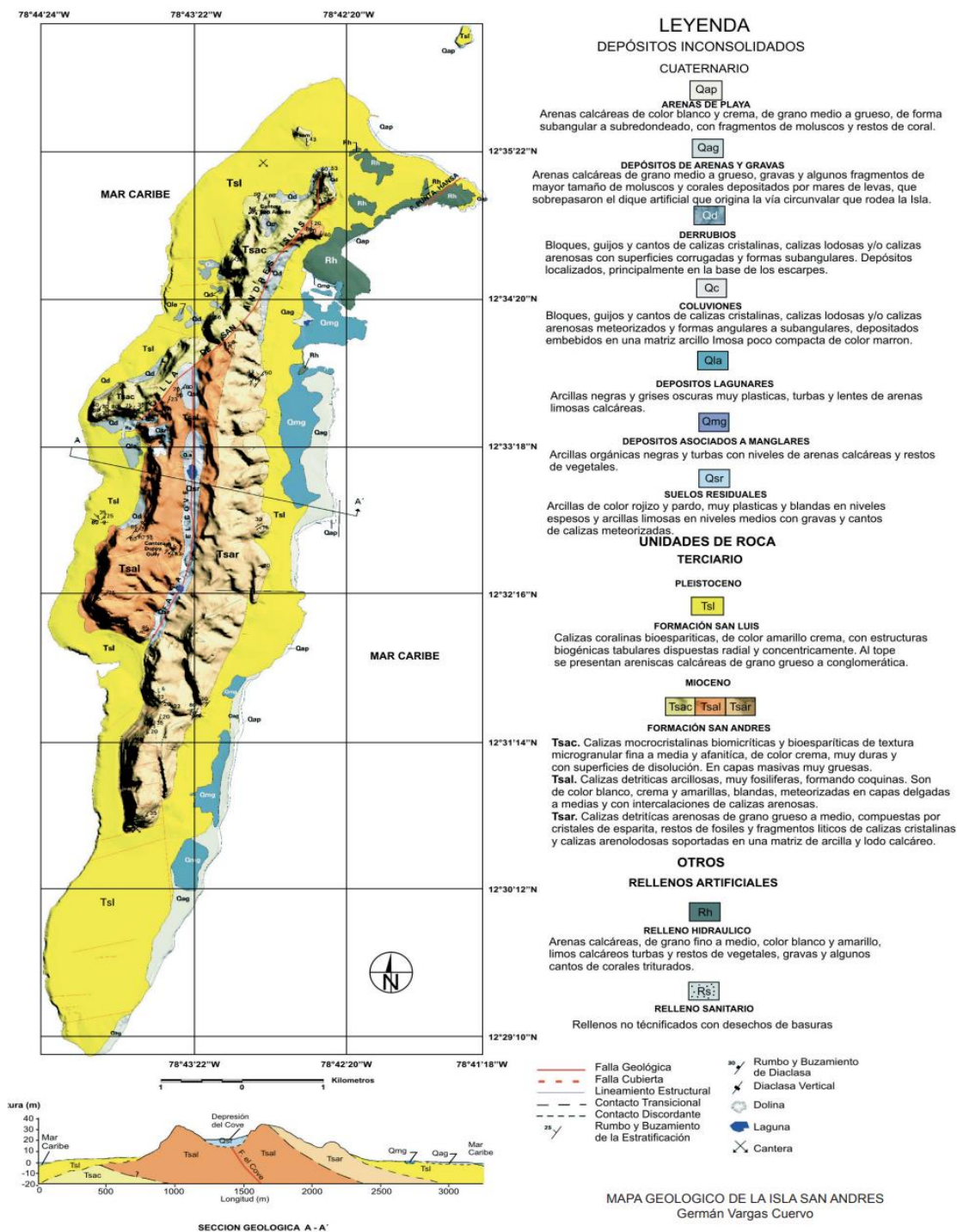
La estructura, que se extiende a lo largo de 3.5 km, está ubicada en el centro de la isla y se distingue por su trazo rectilíneo y su marcado contraste morfológico. Se caracteriza por un alto grado de fracturación en las rocas calcáreas arcillosas de la Formación San Andrés, así como por la presencia de zonas kársticas alineadas y lagunas superficiales que siguen un patrón similar (Vargas-Cuervo, 2004).

La falla presenta una orientación predominantemente N-S en su segmento norte, mientras que en el segmento sur su orientación cambia a SSW-NNE. Basándose en su trazo, se estima que se trata de una falla normal, probablemente con una inclinación hacia el este (Vargas-Cuervo, 2004).

4.2.2.3. Falla de Punta Hansa

La falla se ubica en la región de Punta Hansa, en el extremo noreste de la isla. Presenta una dirección de N55°E y evidencia un movimiento de rumbo sinistral; a partir de las fotografías aéreas, se determinó un desplazamiento de aproximadamente 50 metros. Esta falla afecta tanto las rocas coralinas de la plataforma emergida de la Formación San Luis como el coral submarino, se estima que es una falla del subreciente (Vargas-Cuervo, 2004).

Figura 4-3. Distribución espacial unidades geológicas



Fuente: Tomado y modificado de Vargas (2004)

4.2.3. Geología local

Para describir la geología local (Figura 4-3), se utilizó la información litológica recopilada por Unal (2010), Ingeominas (1997) y PROTECNO (2020), quienes en sus estudios detallan la litología de 57 pozos.

Estos pozos se encuentran concentrados principalmente en las regiones norte y central de la isla. A partir de estos registros, se han establecido 11 grupos de rocas: arcillolita, limolita, arenita, conglomerado, rellenos y seis tipos de calizas, clasificadas según sus características específicas:

1. **Caliza coralina:** con abundancia de fósiles, principalmente corales.
2. **Caliza coralina fracturada:** similar a la anterior, pero con presencia de fracturamiento.
3. **Caliza fracturada:** generalmente compuesta por fragmento de calizas con esparita y con gran fracturamiento.
4. **Caliza porosa:** con alta porosidad primaria.
5. **Caliza:** de textura fina y compacta.
6. **Caliza disuelta:** zonas donde la caliza ha sido afectada por procesos de disolución.

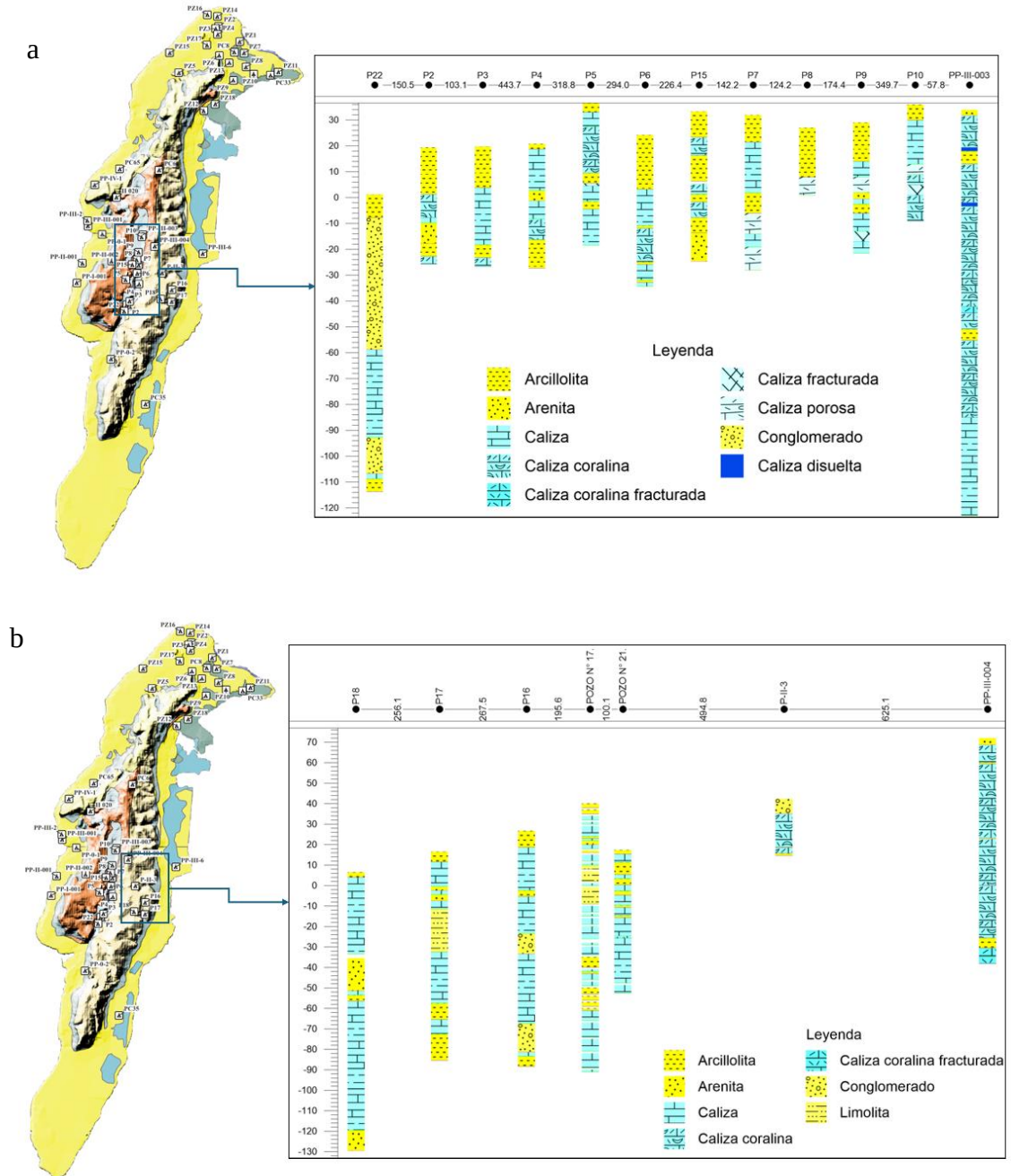
Adicionalmente, los pozos se han agrupado en 6 sectores, según su ubicación y las formaciones geológicas sobre las que se encuentran:

1. **Sector de El Cove:** principalmente sobre depósitos cuaternarios.
2. **Zona centro oriental:** ubicada en la Formación San Andrés (Tsar).
3. **Zona centro occidental:** sobre la Formación San Luis (Tsl).
4. **Aeropuerto:** también sobre la Formación San Luis (Tsl).
5. **Zona norte:** igualmente sobre la Formación San Luis (Tsl).
6. **Zona nororiental:** sobre depósitos cuaternarios de manglar (Qmg) y la Formación San Luis (Tsl).

4.2.3.1. El Cove

En el perfil geológico de la zona de El Cove (Figura 4-4), se observa que el pozo P-22, ubicado en el extremo sur, presenta un mayor contenido de arenitas en comparación con el pozo PP-III-003, situado en el extremo norte, donde predominan las calizas coralinas y fracturadas. Desde el pozo P-22 hacia el pozo P5, el contenido de arenas disminuye gradualmente, mientras que el de calizas aumenta. Este mismo patrón se repite entre el pozo P6 y el pozo PP-III-003. Ambos cambios, caracterizados por una transición gradual de arenitas a calizas, ocurren en dirección sur-norte (S-N).

Figura 4-4. Perfil de pozos ubicados en el sector de El Cove (a) y perfil de pozos ubicados en el sector centro oriental (b).



Fuente: Unal, 2010; Ingeominas 1997, PROTECNO, 2020

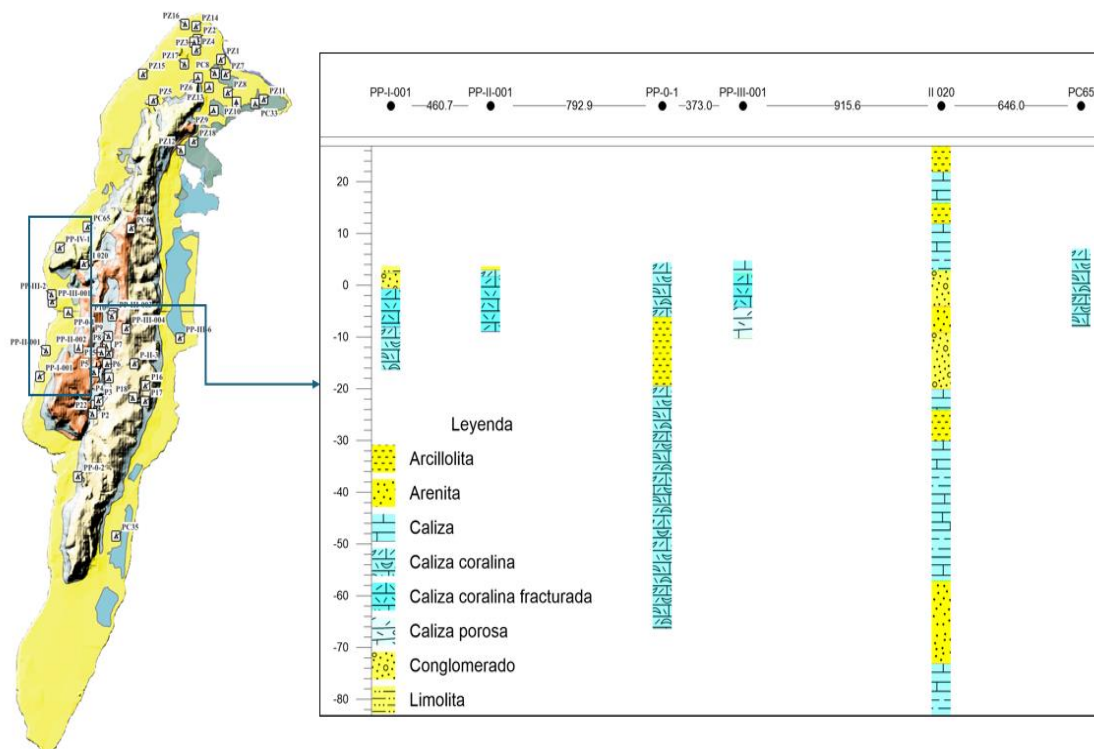
4.2.3.2. Zona centro oriental

La zona centro oriental se localiza al este de la falla de El Cove. En el perfil geológico orientado en dirección SSW-NNE (Figura 4-4 b) que abarca desde el pozo P8 hasta el pozo PP-III-004; desde el P8 hasta el Pozo N° 21, se observa que superficialmente predominan las arcillolitas, las cuales yacen sobre intercalaciones de calizas y arenitas. Hacia el sector norte, se registran algunas ocurrencias de conglomerados y limolitas. Por otro lado, en los pozos más septentrionales (P-II-3 y PP-III-004), destaca la presencia dominante de calizas coralinas, es decir, a medida que se sube estratigráficamente se observa aumento en el registro fósil.

4.2.3.3. Zona centro occidental

El perfil de la zona centro occidental (ver Figura 4-5) está orientado en dirección sur-norte y atraviesa el segmento sur de la falla de San Andrés. En los pozos ubicados al sur de la falla (PP-I-001, PP-II-001, PP-0-1 y PP-III-001), predominan las calizas coralinas y calizas coralinas fracturadas, con algunas ocurrencias menores de arcillolitas y conglomerados. Por otro lado, en el pozo II-020, situado cerca de la zona de falla, se observan intercalaciones de rocas clásticas, destacándose los conglomerados y arenitas, alternados con calizas de textura fina y compacta.

Figura 4-5. Perfil de pozos ubicados en el sector centro occidental.

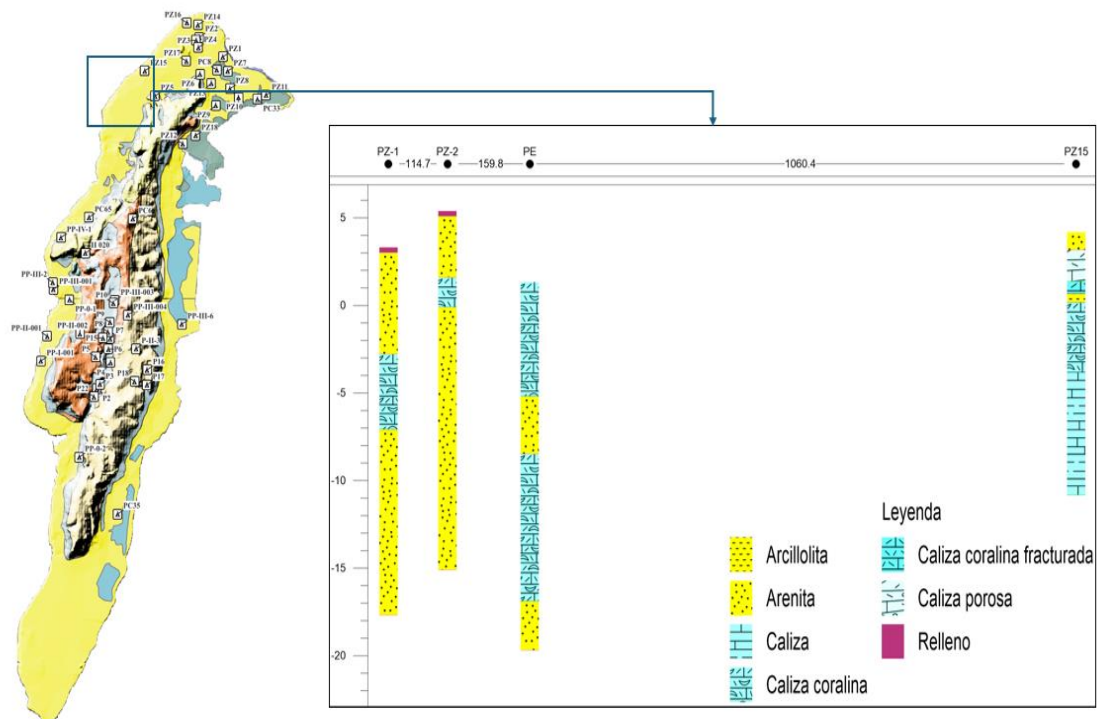


Fuente: Unal, 2010; Ingeominas 1997, PROTECNO,2020

4.2.3.4. Aeropuerto

En la Figura 4-6 se presentan cuatro pozos ubicados en la zona del aeropuerto; hacia el extremo suroccidental, en los pozos PZ-1 y PZ-2, se identifican depósitos de relleno que yacen sobre una secuencia de arenitas y calizas fosilíferas, predominantemente coralinas. En contraste, el pozo exploratorio (PE), ubicado en una cota más baja, no presenta rellenos ni arenitas en su superficie; su registro inicia directamente con calizas coralinas intercaladas con arenitas. Por otro lado, el pozo (PZ-15) situado más al norte muestra en su superficie una capa de arenitas que descansa sobre una secuencia dominada por calizas. Esta secuencia incluye, en orden descendente, calizas porosas, una capa de calizas coralinas fracturadas, seguida de una capa de gran espesor de calizas coralinas, y finalmente, en la base, calizas compactas y duras.

Figura 4-6. Perfil de pozos ubicados en el sector del aeropuerto

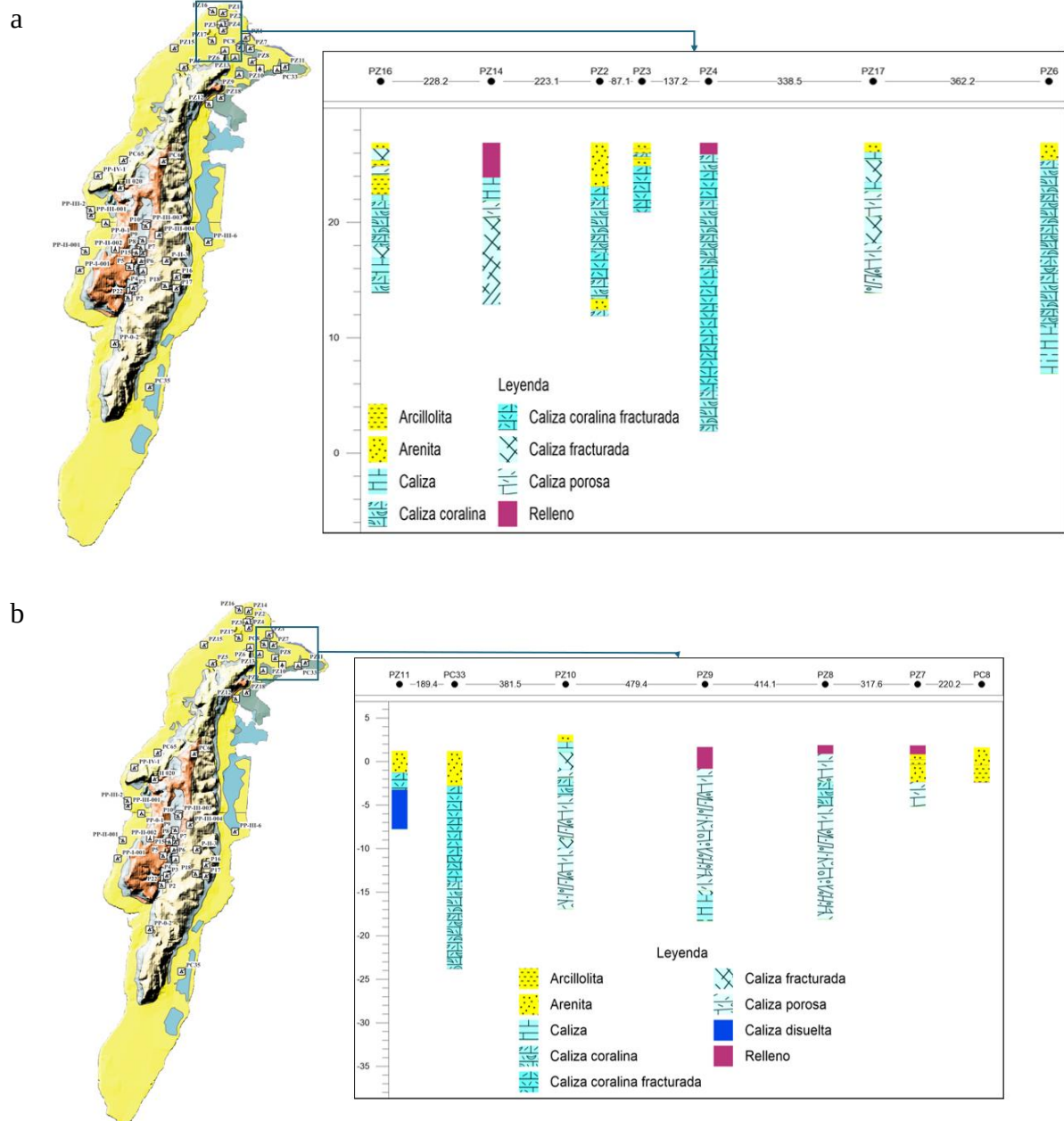


Fuente: Unal, 2010; Ingeominas 1997, PROTECNO, 2020

4.2.3.5. Zona norte

El perfil de la zona norte (Figura 4-7 a) está orientado en dirección Norte-Sur (N-S). En la mayoría de los pozos, predominan las calizas coralinas y calizas coralinas fracturadas. Sin embargo, en los pozos PZ14 y PZ17, se observa una predominancia de calizas porosas y calizas fracturadas. Adicionalmente, en los pozos PZ14 y PZ4, se identificaron superficialmente rellenos de hasta 3.5 metros, mientras que, en los pozos restantes, la capa superficial está compuesta principalmente por arenitas.

Figura 4-7. Perfil de pozos ubicados en el sector norte (a) y perfil de pozos ubicados en el sector nororiental (b).



Fuente: Unal, 2010; Ingeominas 1997, PROTECNO, 2020

4.2.3.6. Zona nororiental

El perfil de la zona nororiental (Figura 4-7 b) se ubica en el área de manglares y está orientado en dirección SE-NW. El pozo más oriental, PZ11, situado cerca de la falla de Hansa, presenta una extensa zona de disolución de caliza. Los dos pozos más al sur muestran superficialmente arenitas, que yacen sobre calizas coralinas fracturadas.

Por otro lado, los pozos ubicados más al norte se caracterizan por una mayor presencia de arenitas y arcillas. En los pozos restantes, predominan las calizas porosas y fracturadas, con algunas ocurrencias de calizas coralinas y calizas de textura fina y compacta. Además, los pozos PZ7, PZ8 y PZ9 presentan superficialmente rellenos.

En conclusión, en el sector de El Cove se observa una predominancia de arenitas con una transición gradual a calizas en dirección sur-norte (S-N). En la región centro oriental, la estratigrafía está compuesta principalmente por arcillolitas superficiales, con intercalaciones de calizas y arenitas, donde predominan las calizas fracturadas y se evidencia un aumento en el registro fósil hacia el norte. En las zonas restantes, predomina la presencia de calizas fosilíferas.

Por otro lado, la presencia de fallas (como la de San Andrés y Hansa) influyen en la distribución y características de las rocas, especialmente cerca de las zonas de falla, donde se observan intercalaciones de rocas clásticas y procesos de disolución; como se puede observar en el pozo II-020.

4.2.4. Información geofísica

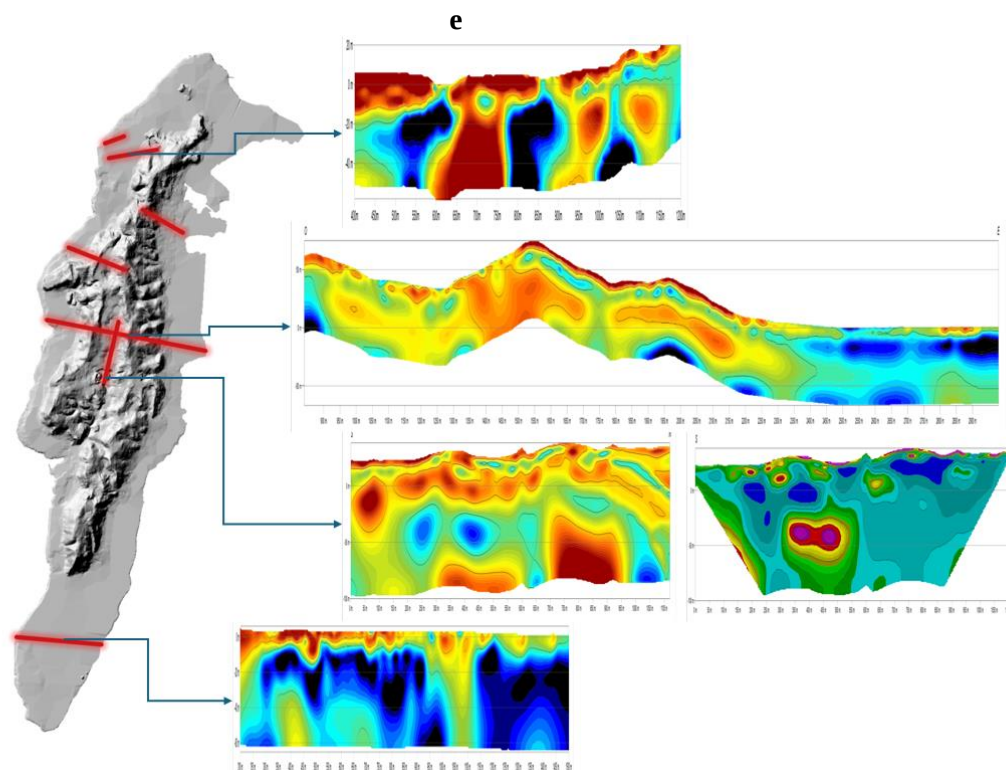
En la Isla de San Andrés se han llevado a cabo diversos estudios geofísicos que han contribuido al conocimiento de su composición y estructura geológica a partir de distintas propiedades físicas. En el ámbito de la magnetometría, Oviedo (2019) identificó variaciones en las propiedades magnéticas del subsuelo. Asimismo, se han realizado mediciones gravimétricas, como las presentadas por Findeter & Smith (2015)

Por último, los estudios geoelectrónicos han sido los más frecuentes en la isla, con investigaciones realizadas por Ingeominas en 1984, 1985 y 1992, así como por Findeter & Smith en 2015. Estos estudios han incluido la aplicación de sondeos eléctricos verticales (SEV), Tomografías de Resistividad Eléctrica (TRE) y Polarización Inducida (IP).

4.2.4.1. Resistividad eléctrica

En San Andrés se ha utilizado el método geofísico de resistividad eléctrica, con dos metodologías Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) realizados por Ingeominas en 1984, 1985 y 1992, en estos documentos se muestra un mapa de isopropiedades de la intrusión salina y dos perfiles; 7 tomografías de resistividad eléctrica (Figura 4-8) y 4 perfiles de polarización inducida.

Figura 4-8. Tomografías de resistividad eléctrica y polarización inducida en San Andrés.



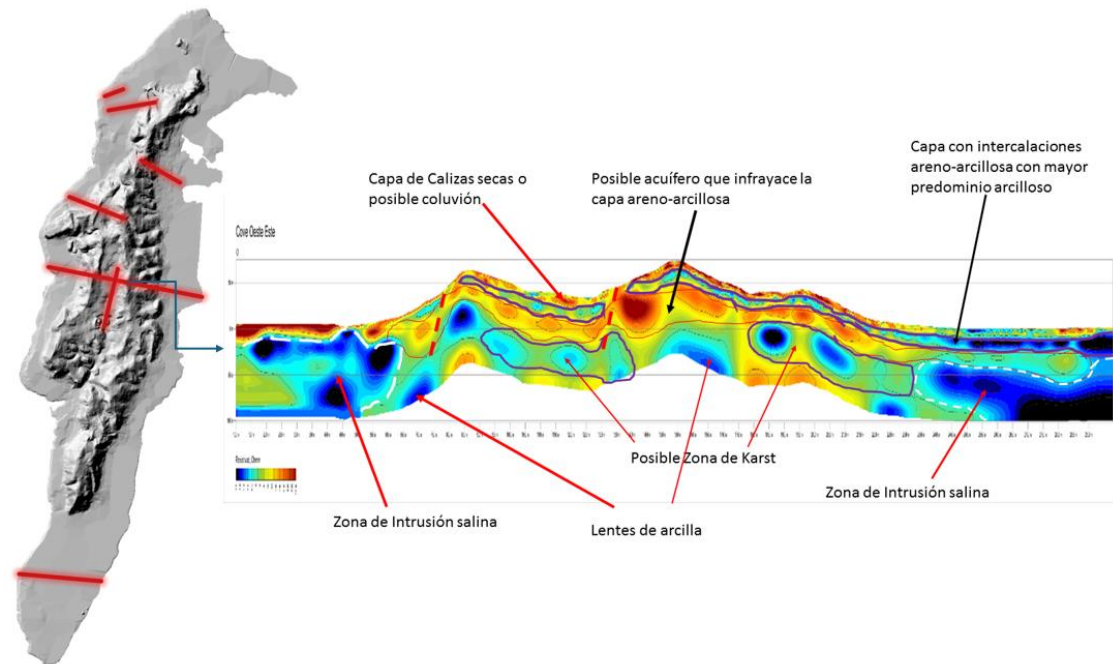
Fuente: Compilado de Findeter & Smith (2015)

En la Figura 4-9 se presenta la Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) realizada por Findeter & Smith (2015) en el sector de El Cove.

De oeste a este y de arriba hacia abajo, se distingue claramente la zona de intrusión salina. En el sector central, se observa una capa de resistividad intermedia, interpretada como un posible depósito coluvial. Esta capa descansa sobre un estrato de resistividades altas, que probablemente corresponde al acuífero principal y se asocia con una formación areno-arcillosa. Por debajo de esta capa, se detectan valores de resistividad bajos, los cuales se han asociado con zonas de karst.

En el extremo este de la tomografía, se identifica una capa delgada y relativamente somera, compuesta por intercalaciones de areniscas y arcillas, con predominancia de estas últimas. Además, en esta zona también se reconoce la presencia de la intrusión marina.

Figura 4-9. Tomografía de resistividad eléctrica en el sector de El Cove, San Andrés.

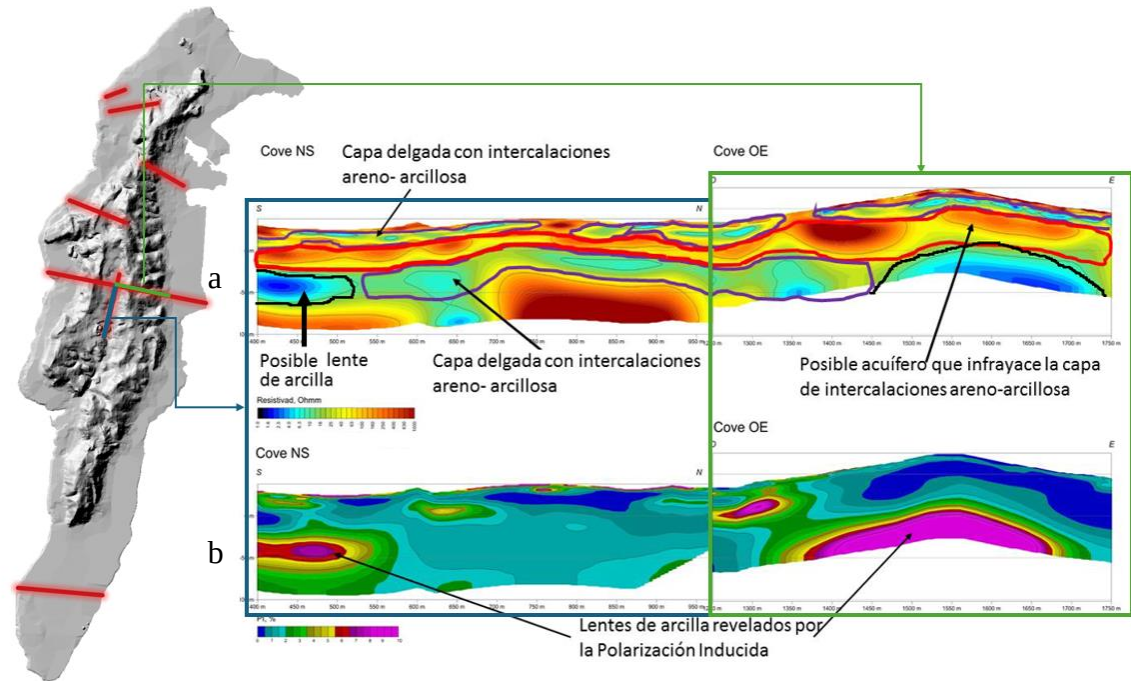


Fuente: Compilado de Findeter & Smith (2015)

4.2.4.2. Polarización inducida

Adicionalmente, en el estudio realizado por Findeter & Smith (2015) se adquirieron cuatro perfiles de polarización inducida (IP), dos de los cuales se presentan en la Figura 4-10. Estos perfiles, analizados en conjunto con las Tomografías de Resistividad Eléctrica (TRE) obtenidas en la zona de El Cove, permitieron identificar la presencia de lentes de arcillas, dado que, en las TRE, se observaban como una zona de baja resistividad, asociada inicialmente a un estrato areno-arcilloso. Sin embargo, al integrar la interpretación de los datos de Polarización Inducida (IP), se logró identificar que, en los extremos de esta capa altamente conductiva la cargabilidad también era alta y, por lo tanto, el contenido de arcillas debía incrementarse significativamente.

Figura 4-10. Tomografías de resistividad eléctrica (a) y perfiles de polarización inducida (b) en El Cove. Tomado y modificado de Findeter & Smith (2015)



Fuente: Findeter & Smith (2015)

Los estudios realizados hasta el momento se han centrado principalmente en la interpretación litológica a partir de datos geofísicos, dejando en un segundo plano el objetivo principal de estas investigaciones: determinar los cambios en la profundidad de la zona de mezcla entre agua dulce y agua salada. Un ejemplo de ello es el trabajo de Ángel (1993), en el que se recopilaban datos de cuatro pozos para analizar las variaciones en la profundidad de la interfaz salina durante los años 1974, 1985 y 1992 (Tabla 4-1)

Tabla 4-1. Variación de la profundidad aproximada de la zona de mezcla en 4 pozos.

Sitio	Coordenadas		Profundidad aproximada de la zona de mezcla		
	X	Y	1974	1985	1992
E Pozo II-9	16500	21500	150	150	50
E Pozo III-6	15800	22000	200	200	90
N Pozo III-3	15500	21300	140	140	50
Pozos 17 y 18	15500	22000	?	75	20

Fuente: Compilado de Ángel (1993)

Los registros evidencian un notable ascenso de la interfaz salina, con fluctuaciones entre 55 y 110 metros durante el periodo analizado. No obstante, la ausencia de datos posteriores a 1992 genera un vacío crítico en la comprensión de la dinámica actual del acuífero, particularmente en un escenario donde factores como el cambio climático, la elevación del

nivel del mar y la presión antropogénica sobre los recursos hídricos han intensificado su vulnerabilidad.

Aunque los estudios geofísicos realizados hasta la fecha han proporcionado información valiosa para caracterizar la intrusión marina, la información disponible actualmente resulta insuficiente para comprender de manera detallada este fenómeno y su evolución. Para obtener una caracterización precisa de la intrusión marina y su evolución temporal, es fundamental implementar técnicas geofísicas modernas con objetivos claros.

Adicionalmente la integración sistemática de estos métodos permitiría actualizar el modelo hidrogeológico regional, identificando con mayor exactitud las áreas donde la intrusión salina ha experimentado un avance significativo en las últimas décadas. Además, facilitaría la implementación de estrategias de gestión más efectivas, orientadas a garantizar la sostenibilidad del recurso hídrico en un contexto de creciente estrés ambiental.

4.3.Caracterización superficial

4.3.1. Precipitación

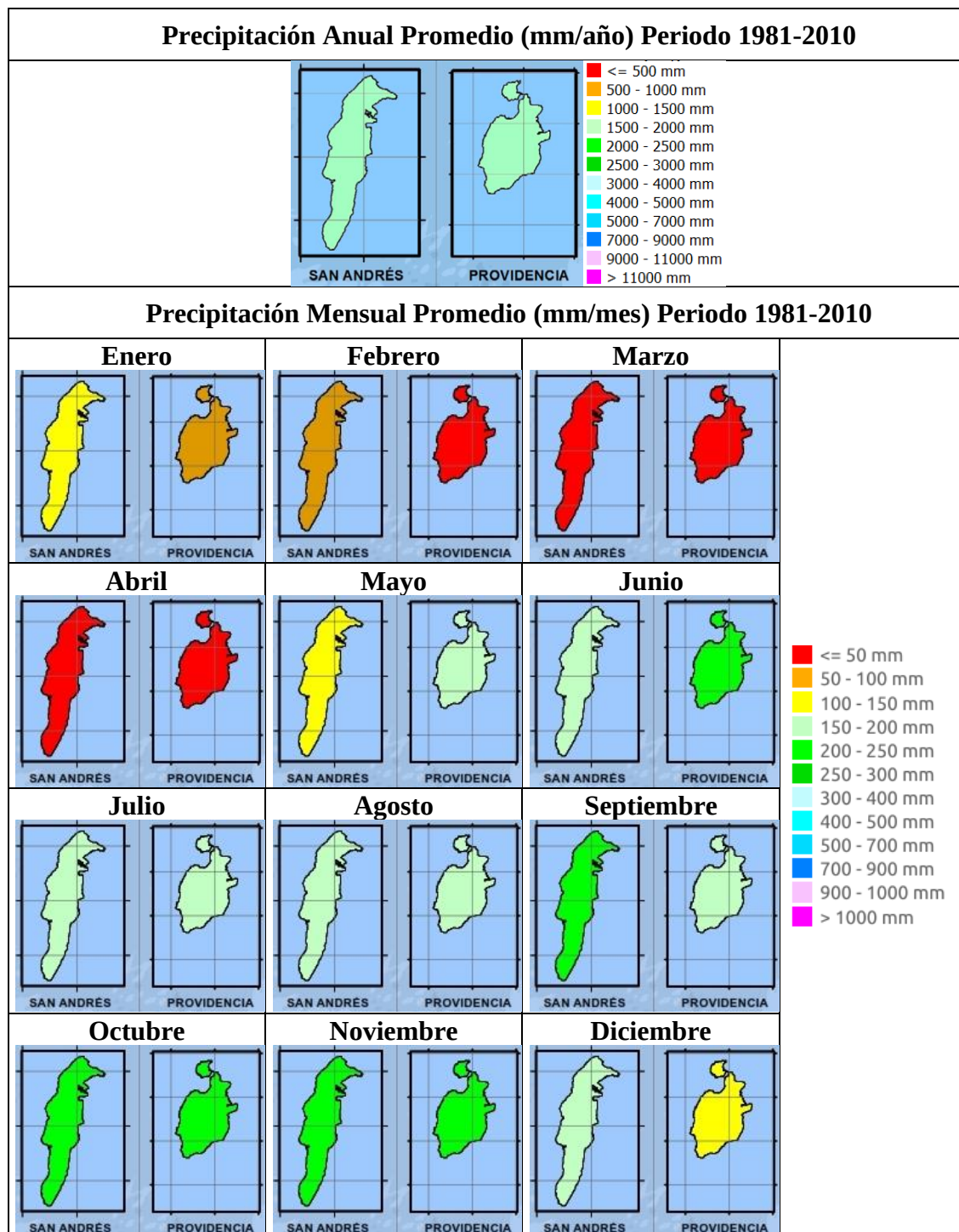
Para el archipiélago, a nivel anual los valores se encuentran entre 1500 y 2000 milímetros, teniendo los mayores valores en San Andrés (con 1880 mm/año aproximadamente), y los menores en Providencia (con aproximadamente 1584 mm/año). A nivel mensual, los menores valores de precipitación se dan entre enero y abril, con lluvias de menos de 150 milímetros mensuales. En mayo San Andrés mantiene valores inferiores a este valor, pero Providencia muestra un aumento a valores entre 150 y 200 milímetros mensuales. Entre junio y noviembre se da el periodo de mayores precipitaciones, con valores entre 150 y 300 milímetros mensuales, y teniendo las mayores lluvias en octubre (con valores de más de 250 milímetros). Por último, en diciembre San Andrés presenta valores de lluvia mensual entre 150 y 200 milímetros mensuales, mientras que Providencia muestra menores valores (entre 100 y 150 milímetros). La ubicación de las estaciones se puede ver en la Figura 4-11 y la distribución de la precipitación en la Figura 4-12.

Figura 4-11 Localización estaciones climatológicas, particularmente registros precipitación.



IDEAM (2025)

Figura 4-12. Precipitación Anual y Mensual para el archipiélago de San Andrés y Providencia



Fuente: Elaboración propia a partir de (IDEAM, 2017)

En la **Figura 4-11** se presenta en nombre las estaciones climatológicas ubicadas en la isla.

Tabla 4-2. Estaciones climatológicas Isla San Andrés origen IDEAM

Nombre	Código	Categoría	Fecha de instalación
Hoyo Soplador	17010020	PM	1986-abr
Empoislas	17010010	PG	1973-abr
Apto Sesquicentena	17015010	SP	1958-ene

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-3. Estaciones climatológicas San Andrés Isla origen IDEAM

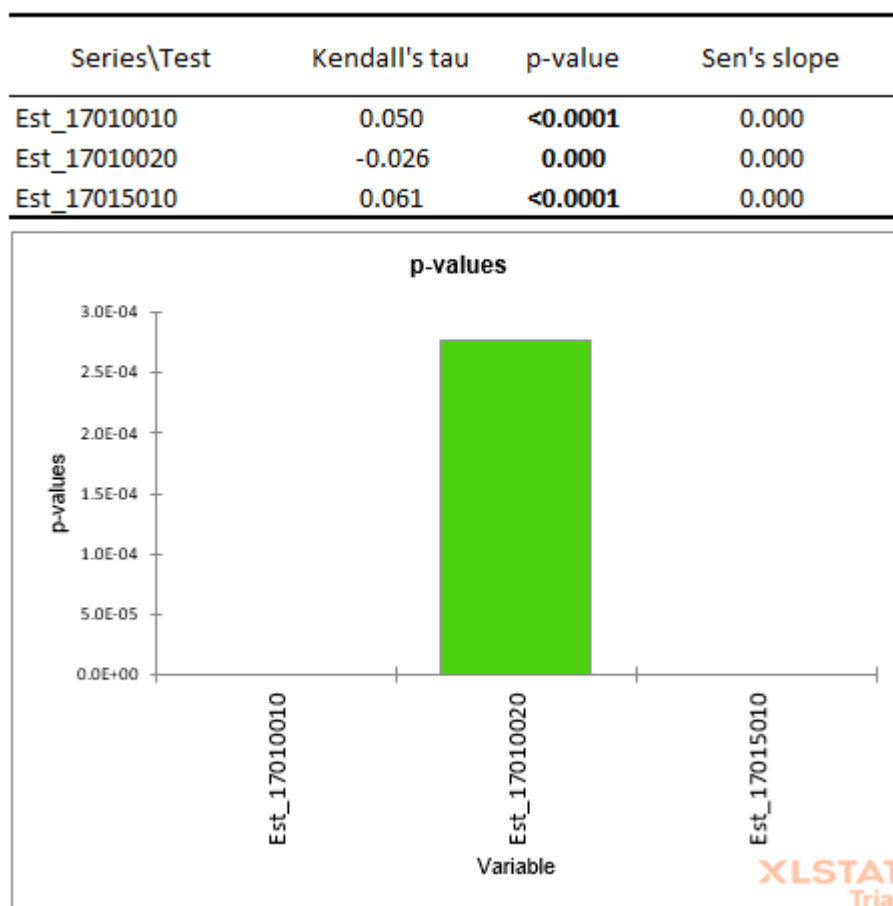
Nombre	Inicio	Final	Nº días	Cant. datos	Faltantes desde inicio	% datos
Empoislas	1974-01-01	2024-12-31	18.628	15.400	3.228	17,3
	1991-01-01	2024-12-31	12.419	11.064	1.355	10,9
Hoyo Soplador	1986-05-01	2024-12-31	14.125	11.747	2.378	16,8
	1991-01-01	2024-12-31	12.419	10.710	1.709	13,7
Apto Sesq.	1962-01-01	2024-12-31	23.011	20.849	2.162	9,4
	1991-01-01	2024-12-31	12.419	11.432	987	7,9

Fuente: Consultoría basado en Ideam (2024)

Dado el inicio del registro de precipitación en la estación Hoyo Soplador y el inicio del registro de la temperatura mínima y máxima en la estación Aeropuerto Sesquicentenario se decidió definir como periodo de análisis 1991 a 2024, de tal forma que se alcance un periodo concomitante entre precipitación de las tres estaciones y la temperatura del aeropuerto Sesquicentenario que pudiese ser igual o mayor de la normal climática 1991-2020, es decir, superar los 30 años de análisis. La visualización de las series de precipitación sin rellenar para el periodo 1991-20024 se presentan en la Figura 4-14.

Previo a la utilización de las series se evaluó su homogeneidad mediante la prueba Mann.Kendall con la cual se identificó que los datos de las tres estaciones no tienen cambios abruptos a lo largo del tiempo, no hay tendencias que no puedan explicarse por las variaciones naturales del clima. Ver Figura 4-13.

Figura 4-13. Resultado prueba Mann-Kendall



En la Tabla 4-4 se presentan las estadísticas básicas de la serie de precipitaciones diarias tanto de las series crudas como completas entre 1991-2024. Para llenado de datos se utilizó método de Vecino Cercano mediante el complemento XLSTAT de Microsoft Excel.

Tabla 4-4. Estadísticas básicas series de precipitación 1991-2024

Variable	Crudos 1991-2024				Llenado 1991-2024			
	Min	Max	Mean	Std. deviation	Min	Max	Mean	Std. deviation
Empoislás	0.0	242.20	5.42	14.09	0.00	242.2	5.37	14.07
Hoyo Soplador	0.0	300.00	4.51	12.83	0.00	300.0	4.38	12.60
Aepto Sesqui	0.0	243.60	5.40	14.03	0.00	243.6	5.19	13.64

Figura 4-14. Precipitación diaria sin rellenar

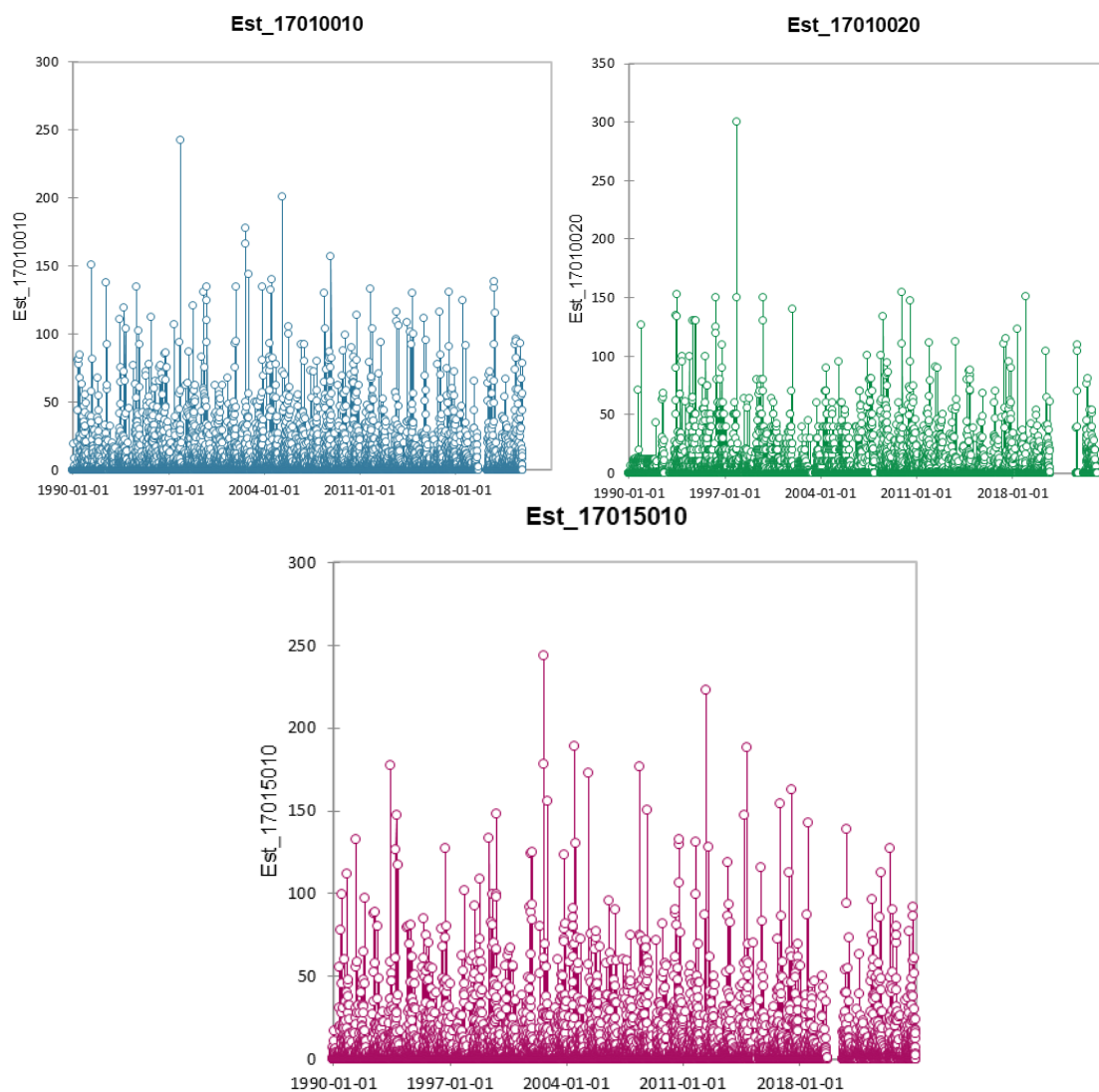
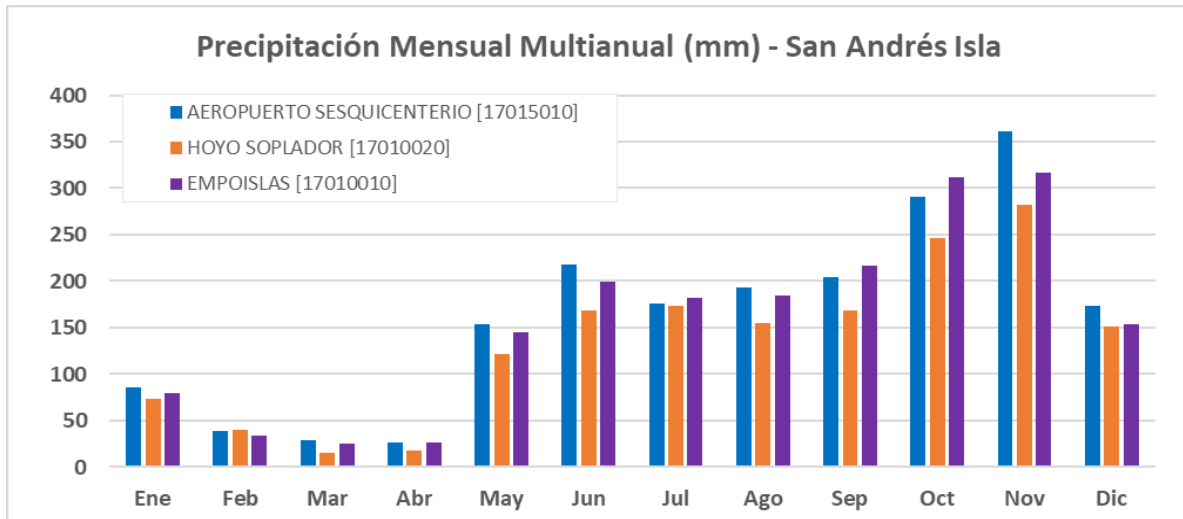
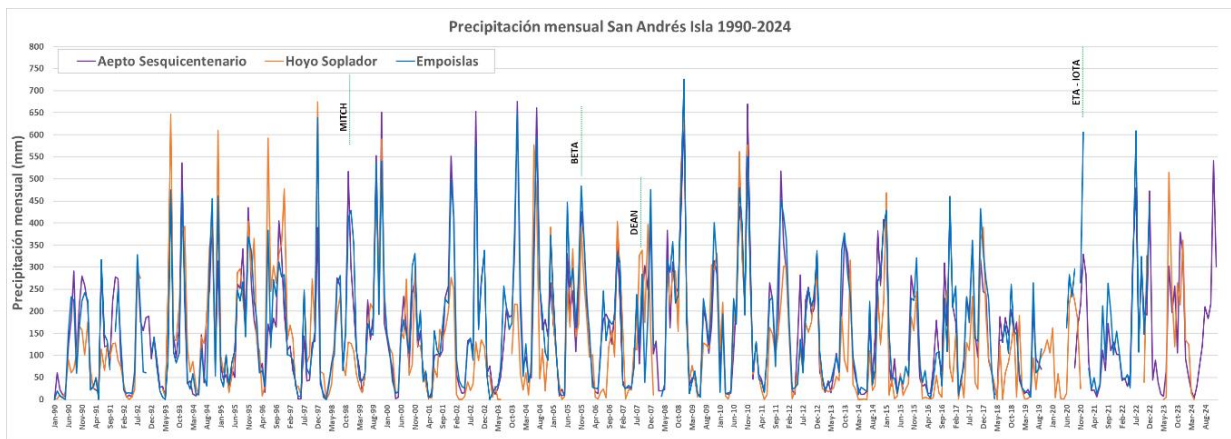


Figura 4-15 Distribución mensual multianual de la precipitación.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4-16 Serie mensual de precipitación 1990-2024 de San Andrés Isla



Fuente: Elaboración propia

4.3.2. Drenajes

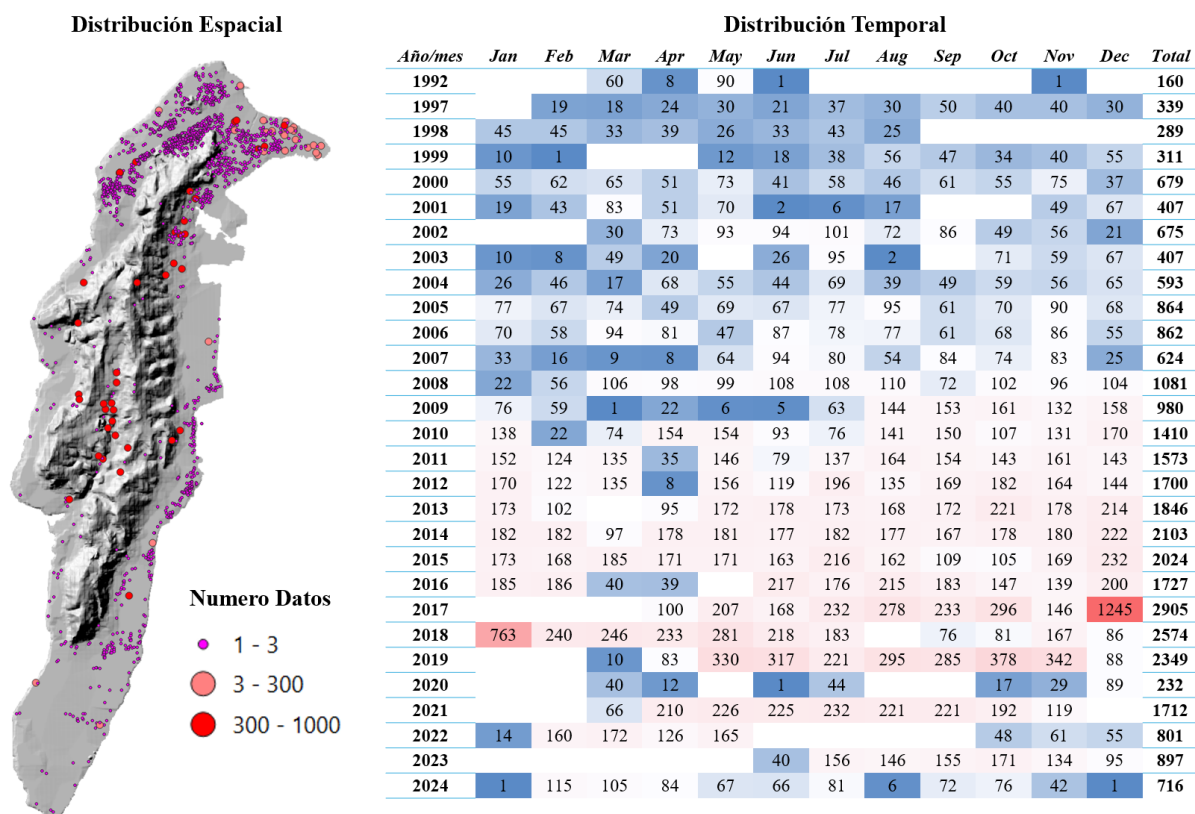
En la Isla de San Andrés no hay corrientes superficiales permanentes, ocasionalmente, durante los períodos lluviosos se forman pequeños cauces, como el de La Rada y El Cove; al occidente de la isla otros caños menores drenan hacia la zona pantanosa del oriente. Estos caños tienen menos de 1 km de longitud, nacen en el sistema de colinas que se presentan en la parte central de la isla y drenan áreas pequeñas. Además, en épocas de lluvia la laguna Big Pond actúa como una zona de recarga lateral del acuífero San Andrés, dado que, sube el nivel de agua de la laguna, lo que termina inundando los terrenos aledaños, los cuales terminan recargando el acuífero por infiltración, a través, de las fracturas y diaclasas que se encuentran en estos terrenos. (Ramírez & Vargas, 2018).

4.4. Características hidrodinámicas

4.4.1. Piezometría

El análisis de la carga hidráulica subterránea constituye una base fundamental para monitorear y evaluar el comportamiento de la superficie freática. Este análisis se lleva a cabo a través de un enfoque temporal y espacial con la información secundaria disponible, tal y cómo se presenta en la Figura 4-17. Se observa que se tiene una buena espacialización de los datos, donde el inventario de Funias llevado a cabo entre diciembre de 2017 y enero de 2018 da una visión completa de la isla, mientras la información temporal de Coralina en los pozos concesionados permite realizar una evaluación de los niveles históricos y por ende de la respuesta del medio a las variaciones climáticas y de demanda a una escala diaria. Las celdas en azul representan los meses con menor cantidad de datos y las celdas en rojo los meses con mayor cantidad de datos.

Figura 4-17. Distribución espacial y temporal datos de niveles



Fuente: Compilado de la información Coralina y Funias

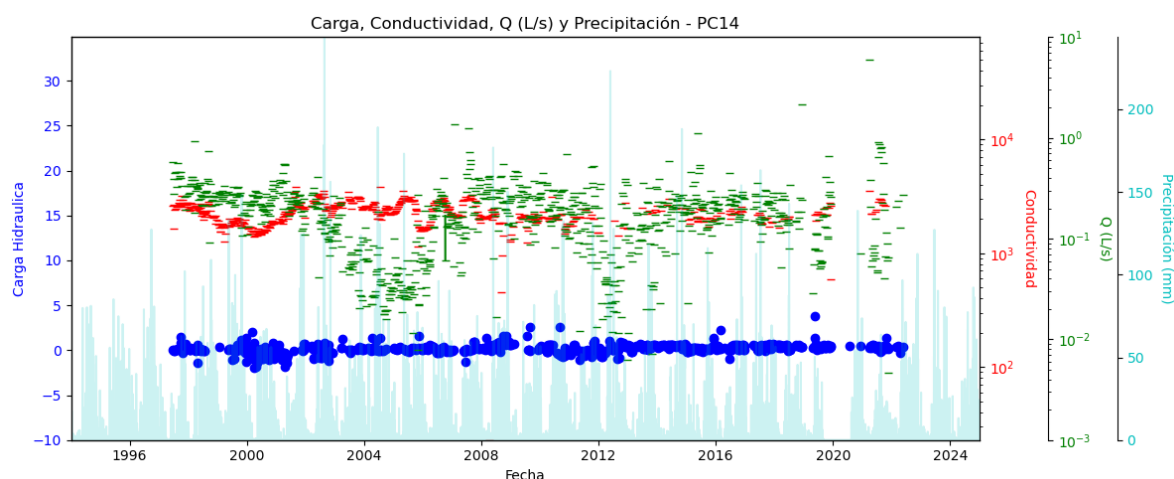
4.4.1.1. Niveles históricos

La información proporcionada por Coralina fue procesada y analizada para obtener un panorama integral sobre la dinámica temporal del sistema hidrogeológico en términos de carga hidráulica, caudales, conductividad eléctrica y precipitación

La metodología de análisis se fundamenta en la presentación de hidrogramas de diversos pozos. La Figura 4-18 ilustra un ejemplo de los hidrogramas empleados, los cuales incluyen variables importantes como la precipitación diaria (en celeste), el caudal de extracción (en verde) y la conductividad eléctrica (en rojo), estas dos últimas representadas en escala logarítmica. Los hidrogramas de todos los pozos se presentan en el Anexo 1 – Hidrogramas.

A partir de lo anterior, se desarrolla un análisis estadístico anual de todos los registros por UPI (Unidades de Planificación Insular), complementado con un análisis espacial por zonas para el periodo 2013–2023. Además, se incluye un análisis temporal a escala horaria enfocado en los efectos de marea.

Figura 4-18. Ejemplo histograma



Fuente: Compilado de la información entregada por Coralina y Funias

En la Tabla 4-5 se presenta el número de registros de nivel piezométrico en pozos que se tiene registrado para este estudio principalmente de lo recopilado por Coralina.

Tabla 4-5. Pozos con registros de niveles piezométricos

Pozo	# Datos de Nivel Piezométrico	Fecha inicio	Fecha Final
PC17	852	22/01/1998	23/05/2022
PC11	851	17/07/1997	23/05/2022
PC5	800	5/02/1997	23/05/2022
PC14	787	18/06/1997	23/05/2022
PC4	780	11/02/1997	23/05/2022
PC13	779	18/06/1997	13/12/2018
PC12	772	17/07/1997	23/05/2022
PC1	771	5/02/1997	23/05/2022
PC9	762	7/03/1997	23/05/2022

Pozo	# Datos de Nivel Piezométrico	Fecha inicio	Fecha Final
PC3	739	5/02/1997	5/04/2018
PC15	736	15/01/1998	23/05/2022
PC7	683	5/02/1997	23/05/2022
PC8	678	14/03/2002	23/05/2022
PC27	657	2/08/2001	23/05/2022
PC35	657	2/08/2001	11/10/2021
PC20	655	1/08/2000	20/05/2019
PC65	634	24/01/2005	23/05/2022
PC18	620	11/08/1999	18/11/2024
PC63	613	19/11/2004	23/05/2022
PC6	609	11/06/1997	23/05/2022
PC25	575	30/03/2001	23/05/2022
PC75	519	29/11/2006	23/05/2022
Pozo D	507	8/02/2007	18/11/2024
Pozo B	503	8/02/2007	18/11/2024
P10	492	3/08/2009	18/11/2024
P13	491	13/07/2009	18/11/2024
Pozo A	490	8/02/2007	18/11/2024
P7	487	3/08/2009	18/11/2024
P14	484	3/08/2009	18/11/2024
P8	482	13/07/2009	18/11/2024
P15A	474	3/08/2009	24/10/2024
P4	473	17/03/1992	18/11/2024
P6	473	17/03/1992	18/11/2024
Pozo C	471	8/02/2007	18/11/2024
P25	449	3/08/2009	24/10/2024
P15	437	13/07/2009	14/11/2024
P3	429	13/07/2009	18/11/2024
PC81	394	21/07/2009	23/05/2022
P23	391	3/08/2009	24/10/2024
PC26	375	24/01/2011	23/05/2022
P27	368	3/08/2009	1/10/2024
PC22	200	29/07/1999	25/05/2022
PC49	185	5/06/2002	23/09/2024
PC39	172	30/07/2001	23/09/2024
PC77	150	29/05/2007	30/07/2012
P4-PZ	148	19/05/2017	13/03/2024
PP-0-2	148	19/04/2017	13/03/2024
P3-PZ	147	19/05/2017	13/03/2024
SOPESA 2	147	19/05/2017	17/05/2024
SOPESA 3	147	19/05/2017	17/06/2024
P6-PZ	146	19/05/2017	13/03/2024
PP-II-002	146	19/05/2017	13/03/2024
PP-II-3	146	19/05/2017	17/03/2024
PP-III-004	146	19/05/2017	17/04/2024
P15-PZ	145	19/05/2017	13/03/2024
PC59	145	31/03/2004	25/05/2022
Elsv Bar	144	19/05/2017	17/02/2025
PN20	144	19/05/2017	17/09/2024
PP-III-003	144	19/04/2017	17/07/2024
POSTOBÓN	141	19/04/2017	17/01/2025
PP-I-001	140	19/04/2017	13/03/2024
PC71	136	26/04/2006	23/09/2024
D-4	135	19/05/2017	13/03/2024
PC56	135	26/03/2003	25/05/2022

Pozo	# Datos de Nivel Piezométrico	Fecha inicio	Fecha Final
PN22	135	5/10/2017	17/10/2024
PC74	132	29/11/2006	25/05/2022
PC32	130	28/07/2006	25/05/2022
PC60	130	29/02/2000	25/05/2022
PC73	127	30/08/2006	25/05/2022
PC24	126	29/07/1999	25/05/2022
PC42	126	30/11/2001	29/02/2016
PC50	126	5/06/2002	26/05/2017
P10-PZ	125	19/05/2017	22/02/2024
PN29	124	19/05/2017	17/12/2024
PC58	123	4/11/2003	19/04/2022
PC38	113	30/11/2000	23/09/2024
PC82	111	28/08/2009	25/05/2022
PC57	109	28/05/2007	25/05/2022
PC68	107	31/10/2005	28/07/2020
PP-II-001	101	26/07/2017	13/03/2024
PC79	93	29/09/2009	25/05/2022
P12	86	19/04/2017	13/03/2024
PC41	86	30/04/2002	25/05/2022
PP-III-001	83	19/05/2017	15/12/2020
PN19	80	19/05/2017	17/08/2024
PC30	78	26/03/2003	28/06/2016
PC54	78	30/04/2002	23/11/2011
PC78	74	29/05/2007	25/10/2017
PC36	66	28/06/2002	27/05/2010
PC21	64	26/03/2003	26/05/2010
PC80	63	28/05/2007	22/08/2011
PN28	62	5/10/2017	17/11/2024
PC64	57	3/01/2005	27/11/2013
PC37	51	30/07/2001	27/10/2009
PC23	46	29/07/1999	28/10/2009
PN26	39	19/05/2017	18/06/2021
PC72	37	7/06/2006	30/08/2013
PC53	36	5/06/2002	25/11/2010
PC70	36	26/04/2006	23/11/2011
PC62	33	30/07/2004	28/08/2008
PC69	29	30/01/2006	28/09/2010
HALLEY	28	19/04/2017	16/11/2018
PC33	12	28/05/2007	29/09/2008
PC85	3	5/07/2015	7/06/2019
P5	2	17/03/1992	17/03/1992

4.4.1.1.1. *Análisis estadístico anual por UPI*

Este análisis consiste en mostrar el promedio anual de las cargas hidráulicas y la mediana de las conductividades eléctrica, agrupando la información de pozo por UPI (Unidades de Planificación Insular) en todo el histórico disponible. Para ello, se utilizaron los registros disponibles entre los años 1995 y 2024, considerando únicamente aquellos pozos que cuentan con más de 100 mediciones en dicho periodo, con el fin de asegurar la representatividad de los resultados.

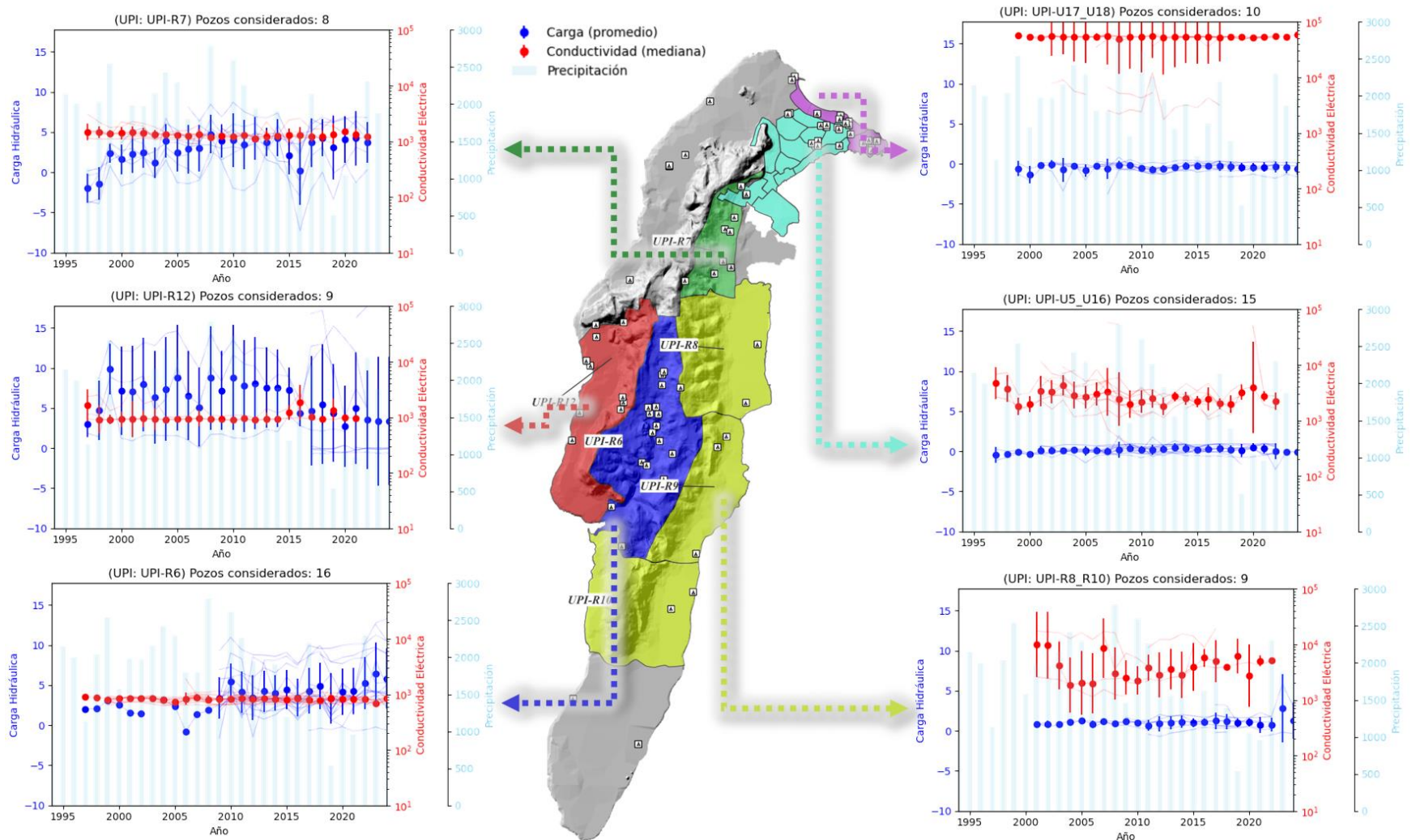
La Figura 4-19 presenta un resumen estadístico general por UPI, incluyendo las siguientes unidades: UPI-R11, UPI-R12, UPI-R3, UPI-R4, UPI-R6, UPI-R7, UPI-R8 hasta R10, UPI-

U17 y U18, UPI-U1 hasta la U3 y UPI-U5 hasta la U16. Las UPI no incluidas fueron excluidas del análisis debido a la ausencia de datos representativos que permitieran una evaluación estadística confiable de las variables consideradas. Cabe señalar que las UPI fueron agrupadas en función de su ubicación geográfica y del contexto hidrogeológico común, con el fin de facilitar la comparación e interpretación regional de los resultados.

- **UPI-R7:** Se cuenta con datos de carga hidráulica en 26 pozos (mínimo: -2.00, mediana: 3.27, máximo: 4.73) y de conductividad eléctrica en 26 pozos (mínimo: 1127.00, mediana: 1305.57, máximo: 1482.00 $\mu\text{S/cm}$). Se observa una alta variabilidad en la carga hidráulica, con una respuesta evidente ante los periodos secos y húmedos. Además, se identifica una tendencia general al aumento de la carga desde 1995. En cuanto a la conductividad eléctrica, aunque los valores se mantienen relativamente constantes en el tiempo, se evidencia una ligera reducción promedio para la zona. No obstante, esta variable no muestra cambios significativos en relación con las variaciones climáticas estacionales.
- **UPI-R12:** Se registraron datos de carga hidráulica en 28 pozos (mínimo: 2.76, mediana: 6.84, máximo: 9.92) y de conductividad eléctrica en 25 pozos (mínimo: 892.89 $\mu\text{S/cm}$, mediana: 937.94 $\mu\text{S/cm}$, máximo: 1843.64 $\mu\text{S/cm}$). La conductividad eléctrica muestra un comportamiento relativamente estable a lo largo del tiempo, con incrementos puntuales en los años secos de 1994, 2016 y 2019, donde se observa un aumento en la mediana del orden de $\pm 1000 \mu\text{S/cm}$. En cuanto a la carga hidráulica, esta presenta una relación directa con los patrones de precipitación. Sin embargo, se destaca que la disminución en los valores medios observada en 2016 a la actualidad obedece principalmente a la incorporación de nuevos datos y no necesariamente a una condición de sobreexplotación del sistema hidrogeológico.
- **UPI-R6:** Corresponde al área de El Cove y presenta datos de carga hidráulica en 27 pozos (mínimo: -0.76, mediana: 3.45, máximo: 6.46) y de conductividad eléctrica en 28 pozos (mínimo: 680.33 $\mu\text{S/cm}$, mediana: 828.34 $\mu\text{S/cm}$, máximo: 905.73 $\mu\text{S/cm}$). A lo largo del periodo de análisis, la conductividad eléctrica se mantiene relativamente constante, con valores cercanos a los 1000 $\mu\text{S/cm}$. En cuanto a la carga hidráulica, a partir del año 2009 se identifica el inicio de un monitoreo más exhaustivo de niveles, lo que permite observar una clara respuesta a las variaciones en la precipitación. En este sentido, la media de la carga muestra fluctuaciones de varios metros en función de los niveles de lluvia registrados, siendo notoria la disminución durante el año 2019, seguida de una recuperación generalizada en 2021.
- **UPI-R8_R10:** Se cuenta con datos de carga hidráulica en 24 pozos (mínimo: 0.67, mediana: 1.03, máximo: 2.86) y de conductividad eléctrica en 22 pozos (mínimo: 1869.43 $\mu\text{S/cm}$, mediana: 3856.95 $\mu\text{S/cm}$, máximo: 10003.53 $\mu\text{S/cm}$). La carga hidráulica muestra valores relativamente constantes a lo largo de los años. En contraste, la conductividad eléctrica presenta una alta variabilidad, con diferencias cercanas a un orden de magnitud entre los registros. Sin embargo, estas variaciones no parecen guardar una relación directa con los patrones anuales de precipitación.

- **UPI-U5_U16:** Datos de carga hidráulica en 28 pozos (mínimo: -0.44, mediana: 0.16, máximo: 0.50) y de conductividad eléctrica en 26 pozos (mínimo: 1779.62, mediana: 2566.44, máximo: 4718.96 $\mu\text{S/cm}$). En esta zona los niveles son relativamente constantes muy cercanas al nivel del mar, mientras que las conductividades eléctricas parecen responder levemente a las precipitaciones
- **UPI-U17_U18:** Se cuenta con datos de carga hidráulica en 26 pozos (mínimo: -1.32, mediana: -0.40, máximo: -0.07) y de conductividad eléctrica en 26 pozos (mínimo: 48962.53 $\mu\text{S/cm}$, mediana: 53575.47 $\mu\text{S/cm}$, máximo: 58250.00 $\mu\text{S/cm}$). En esta zona, las cargas hidráulicas se encuentran próximas al nivel del mar, mientras que las conductividades eléctricas se mantienen en el orden de los 50,000 $\mu\text{S/cm}$, lo que evidencia la presencia de agua subterránea salina. Se identifican dos registros atípicos que sugieren posibles zonas de mezcla, los cuales incrementan la desviación estándar, aunque no afectan significativamente la mediana de los datos.

Figura 4-19. Histogramas escala anual por UPI



Fuente: Este trabajo

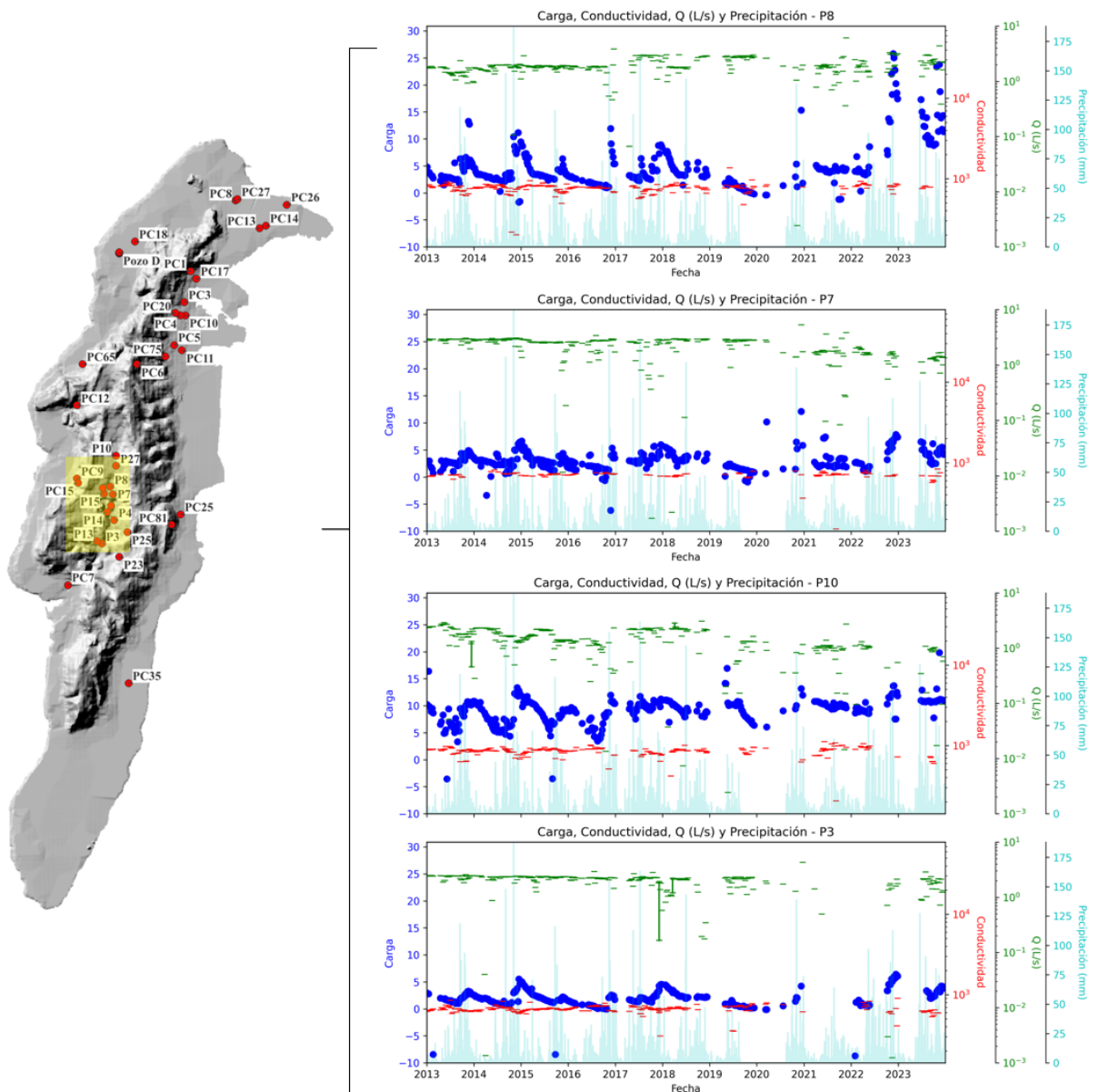
4.4.1.1.2. Análisis 2013-2023 por áreas escala diaria

El análisis se lleva a cabo considerando la evolución temporal de estas variables dentro de un área específica en una **escala diaria evaluando pozos representativos**, permitiendo una interpretación detallada de las dinámicas hidrogeológicas del sistema

(i) Area del cove

Para el área de Cove (ver Figura 4-20) se seleccionaron los pozos P8, P10, P7, y P3, ya que cuentan con uno de los registros históricos más completos en la base de datos.

Figura 4-20. Histogramas para el área de Cove: P8, P10 P7 y P3



Fuente: Grafica realizada a partir de la información entregada por Coralina

Los histogramas muestran una respuesta clara a la precipitación: durante picos de lluvia, la carga hidráulica aumenta rápidamente, mientras que en épocas secas desciende de forma gradual. Este patrón se repite en todos los pozos, con el ascenso generalmente posterior a una precipitación máxima. A pesar de estar en un régimen constante de extracción, los niveles responden más a eventos de lluvia. Los cambios en los niveles afectan las conductividades eléctricas, aunque estas se mantienen en el mismo orden de magnitud en el tiempo, evidenciando ligeros procesos de mezcla que no cambian en gran medida la tendencia de las conductividades del acuífero.

Así mismo en el año 2022 que fue un año poco lluvioso las cargas hidráulicas en todos los pozos se mantuvieron constantes.

En esta misma figura pueden observarse procesos de manera más puntual por ejemplo en pozo P8 desde el 2023 existe un aumento en la carga hidráulica atípico a lo que se venía presentando, manteniendo caudales similares, esto puede deberse a procesos de colmatación en alguno de los ranurados del pozo.

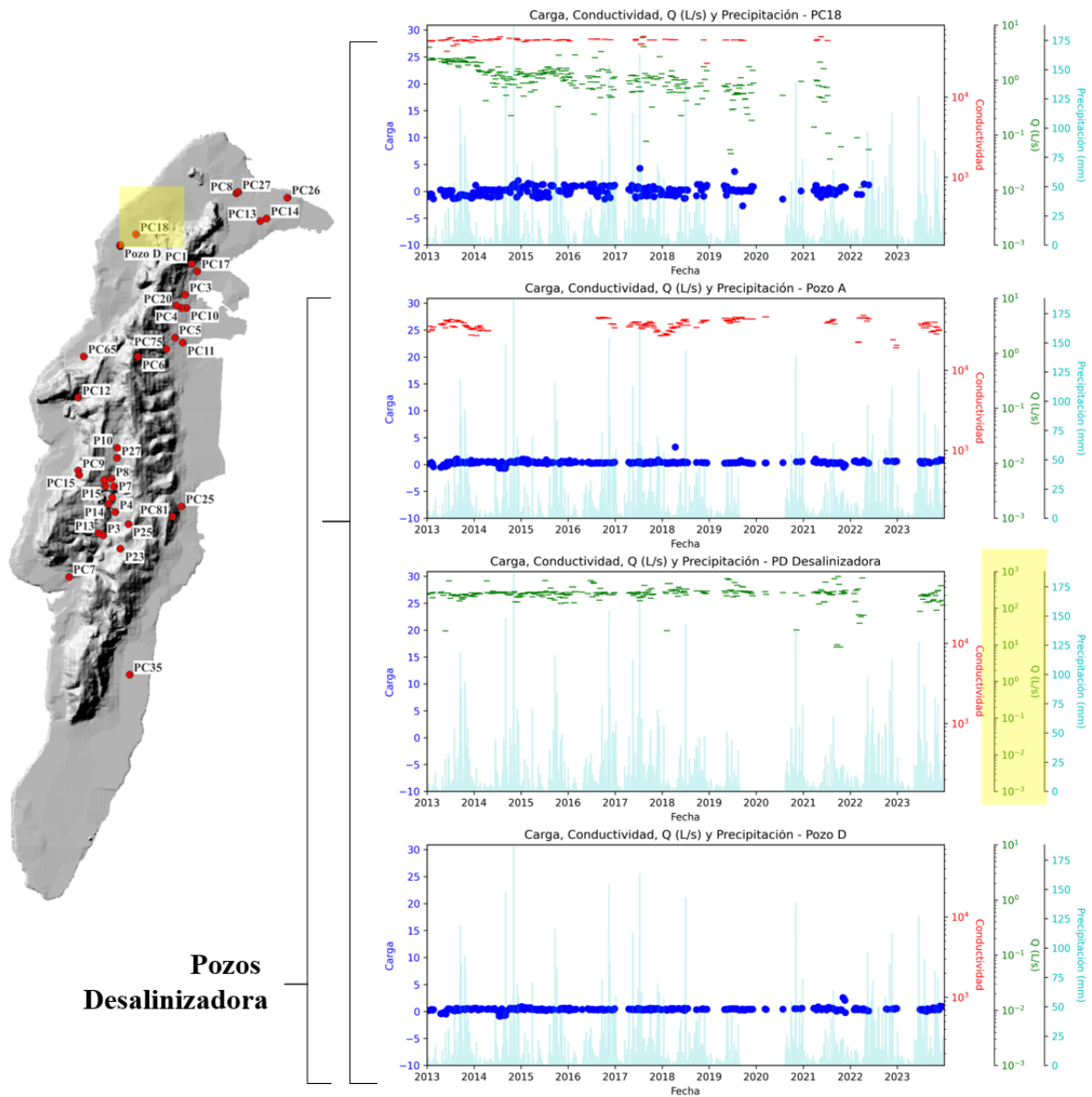
(i) Aeropuerto

En el área del aeropuerto (ver Figura 4-21), donde se encuentran los pozos de la desalinizadora (Pozo A y Pozo B) y el PC-18.

De la figura siguiente se observan cargas hidráulicas relativamente constantes. En la desalinizadora, se registran caudales bastante altos, superiores a 200 l/s (PD-Desalinizadora), sin que esto afecte la carga hidráulica, es decir, con abatimientos mínimos del orden de centímetros, esto indica una alta conexión hidráulica (lo suficiente para mantener el nivel a pesar de la explotación) con el mar que actúa como una frontera de carga constante con un almacenamiento infinito.

Sin embargo, los valores de conductividad eléctrica en el Pozo A superan los 10,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y parecen estar influenciados principalmente por eventos de precipitación. A medida que avanza la temporada de lluvias, la conductividad disminuye, mientras que en la época seca tiende a aumentar. En contraste, en el pozo PC-18, los valores de conductividad se mantienen constantes, pero son cercanos a los del agua de mar ($<30,000 \mu\text{S}/\text{cm}$), lo que evidencia que extrae agua subterránea salada. (de este último no se tiene diseño ni profundidad del pozo).

Figura 4-21. Histogramas para Aeropuerto: PC18, Pozo A, PD desalinizadora y Pozo D

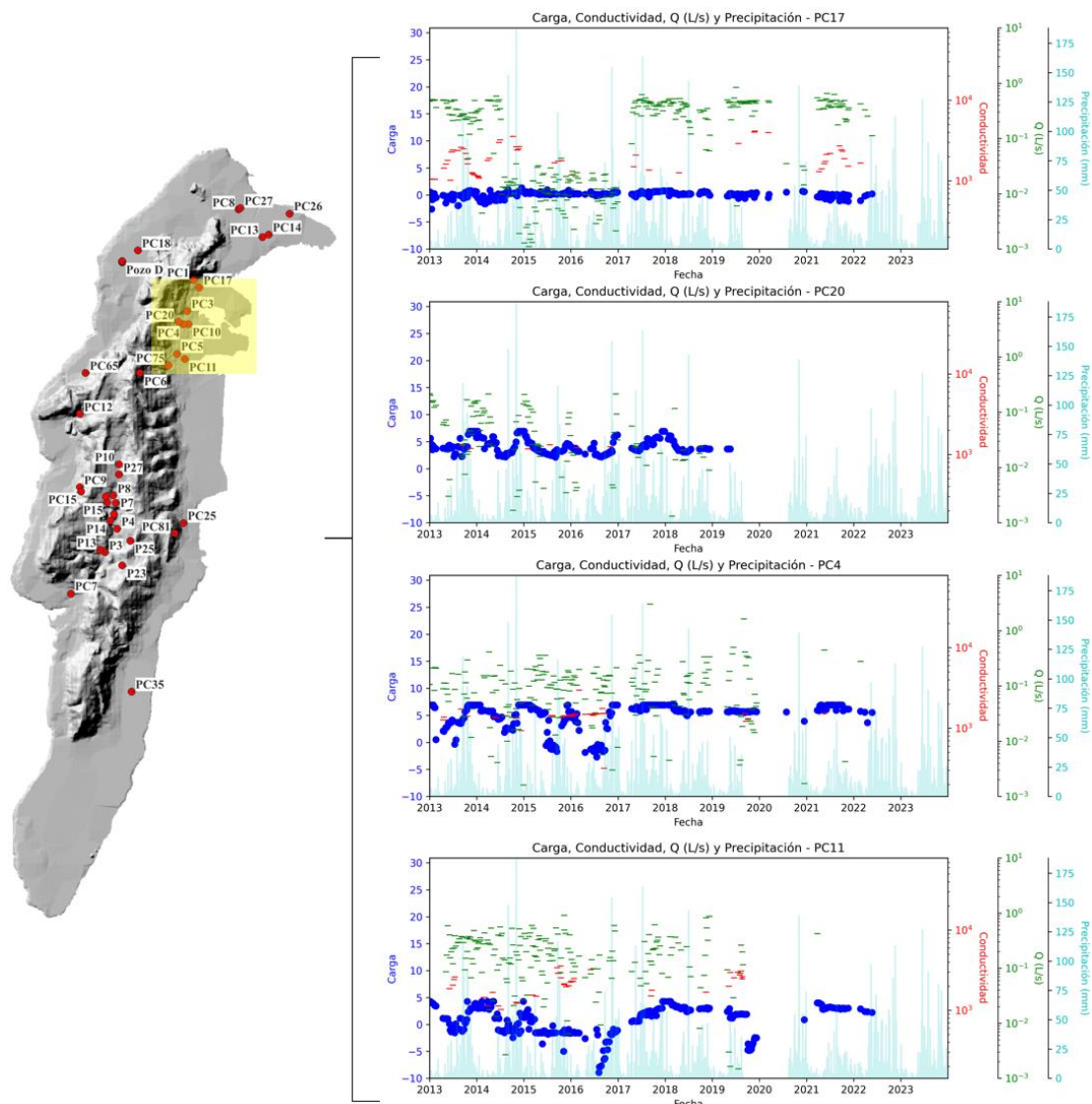


Fuente: Grafica realizada a partir de la información entregada por Coralina

(i) Area cercana al centro y Hainenes Bright

En el muelle y al Haines Bright (ver Figura 4-22), se seleccionaron los pozos PC17, PC20, PC4 y PC11

Figura 4-22. Histogramas para Haines Bright: PC17, PC20, PC4 y PC11



Fuente: Grafica realizada a partir de la información entregada por Coralina

En estos se observan dos comportamientos distintos: (1) un comportamiento similar al del PC17, donde los niveles permanecen relativamente constantes, como se ha descrito en la zona central; y (2) un comportamiento en los pozos PC20, PC4 y PC11, que parecen responder a cambios en los regímenes de precipitación y, en menor medida, a variaciones en los regímenes de bombeo.

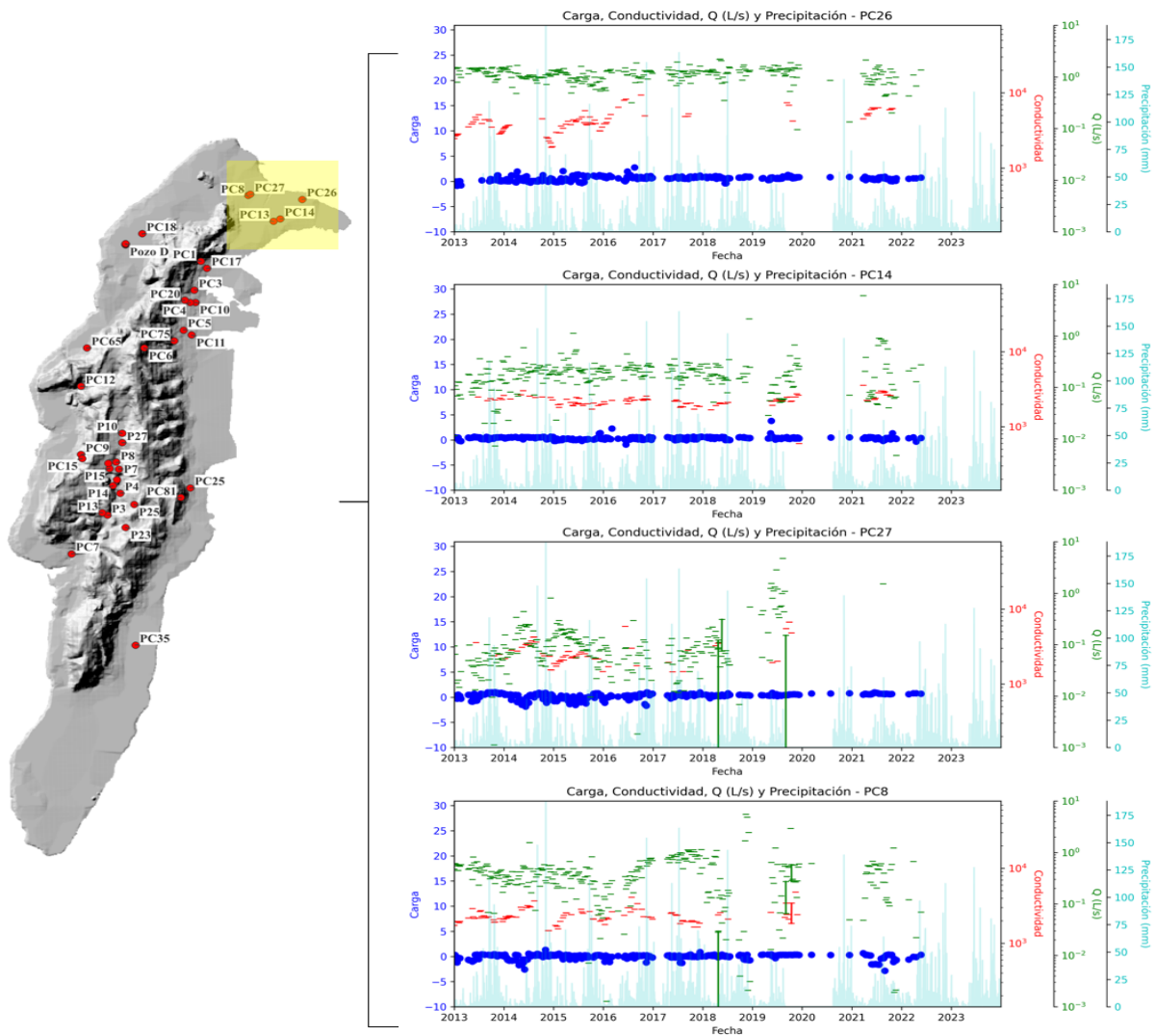
No obstante, el pozo PC11 presenta cambios marcados en la conductividad, los cuales responden a variaciones en los caudales de explotación. Este comportamiento es coherente con su proximidad a la línea de costa y su cercanía a la intrusión marina.

(ii) Área del centro urbano

En el área del centro (ver Figura 4-23), se seleccionaron los pozos PC26, PC14, PC27 y PC8. En estos, las cargas hidráulicas se mantienen relativamente constantes y cercanas al nivel del mar, sin respuestas en la precipitación. Sin embargo, la explotación provoca niveles dinámicos, llegando a situarse por debajo del nivel del mar, posiblemente en función del caudal y la permeabilidad del medio.

Además, eventos de precipitación y cambios en los caudales de explotación reflejan en un aumento significativo de las conductividades eléctricas, alcanzando incrementos de miles de $\mu\text{S}/\text{cm}$ de manera proporcional a estas dos variables para todos los pozos en esta zona.

Figura 4-23. Histogramas para el área del centro: PC26, PC14, PC27 y PC8

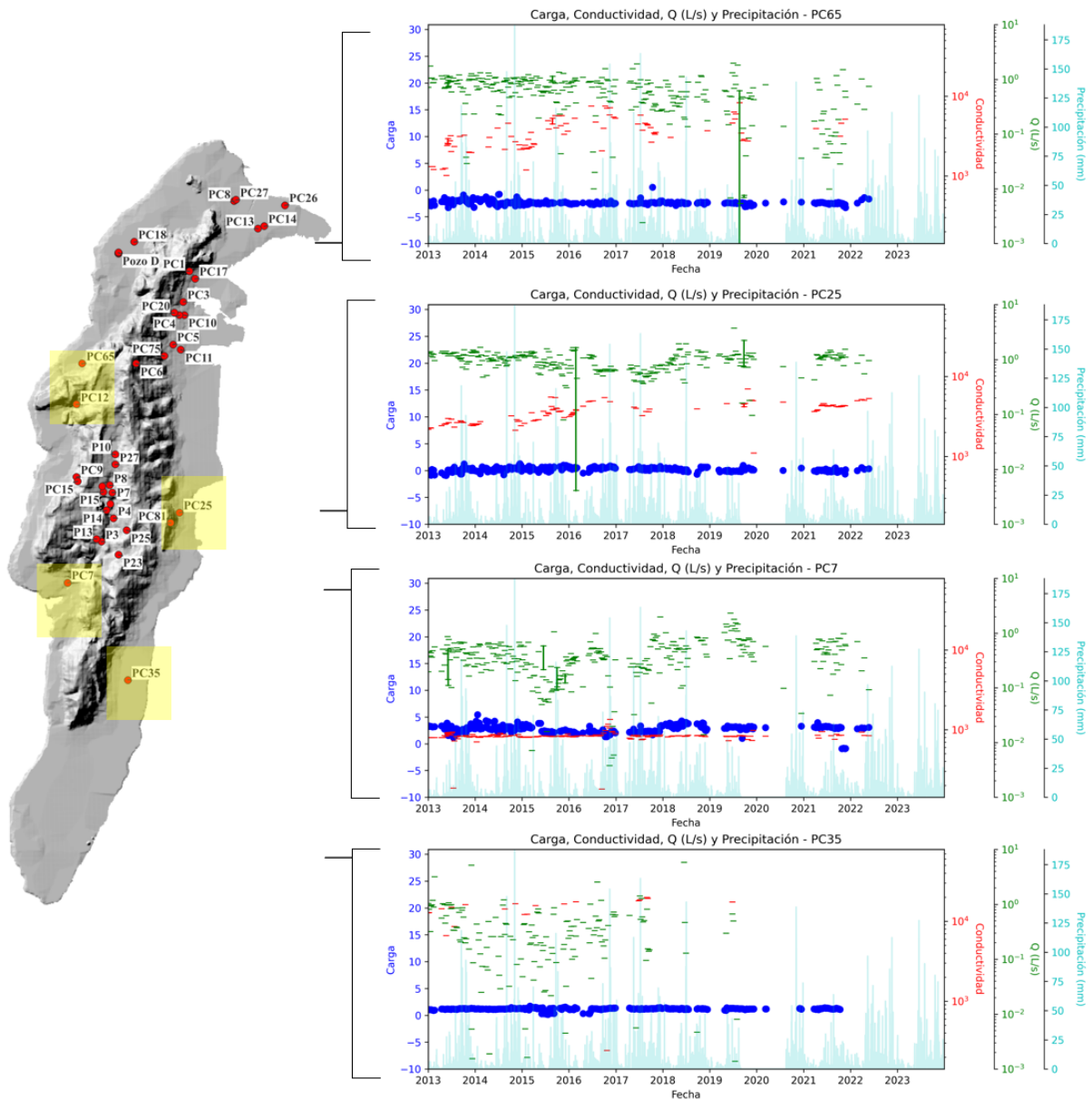


Fuente: Gráfica realizada a partir de la información entregada por Coralina

(iii) Otras áreas

Otras áreas, donde los pozos están ubicados en puntos específicos

.Figura 4-24. Histogramas para otras zonas: PC65, PC25, PC7 y PC35



Fuente: Grafica realizada a partir de la información entregada por Coralina

De la .Figura 4-24, de la cual se puede describir lo siguiente:

- El PC65 en el lado centro-oeste de la isla presenta niveles relativamente constantes con una variación de caudales alta que se no afecta la carga hidráulica en gran medida del pozo, la conductividad

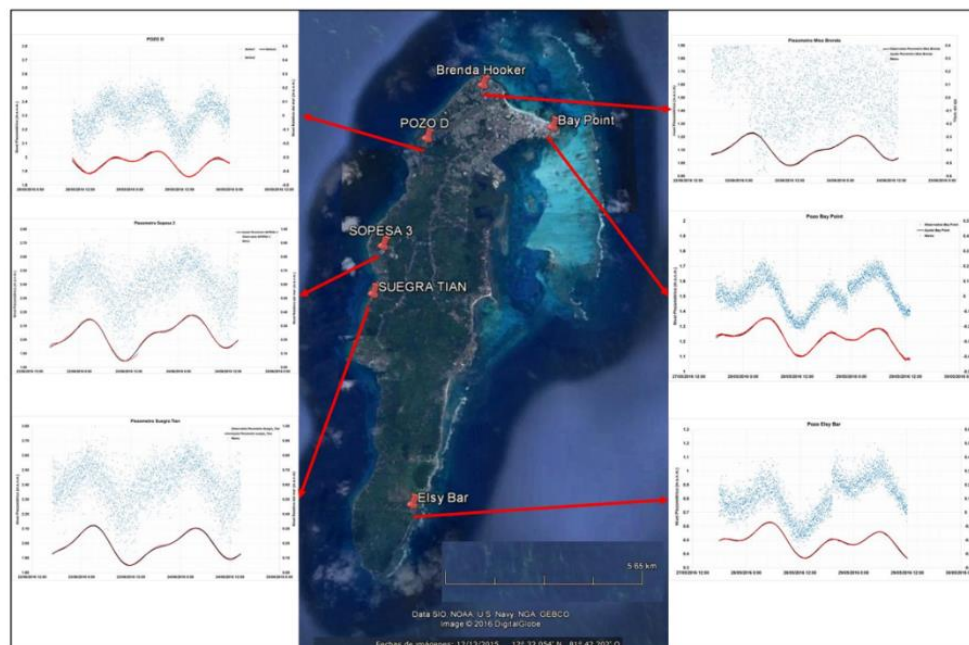
- El PC25 muestra un comportamiento constante en las cargas hidráulicas y con régimen de bombeo variable, aunque hay una respuesta de la conductividad eléctrica al bombeo este ha esta se encuentra en un ascenso posiblemente en función de los años secos 2019 y 2022.
- El PC-7 muestra variaciones de pocos metros en la carga hidráulica producto de la combinación de un régimen de bombeo altamente variable y precipitaciones, es interesante observar que la conductividad eléctrica se mantiene constante a unos 1000 us/cm posiblemente una zona de descarga que no fluctúa con la precipitación.
- El PC35 muestra niveles constantes independientes de las tasas de bombeo variables.

4.4.1.1.3. Niveles piezométricos y relación con las mareas

En el estudio de Findeter, 2016 han mostrado la influencia de la marea en mediciones a escala de horas/minutos (ver Figura 4-25) , lo cual denota la influencia de las cargas hidráulicas del mar.

En este estudio se indica lo siguiente : *“De estas mediciones se puede observar que la amplitud de la marea en la costa occidental de la Isla es mayor que la zona oriental, es lógico pues en esta zona de isla el fondo del mar se profundiza abruptamente en la zona de costa, dando como resultado un oleaje mayor y la medición del nivel relativo del mar genera una gran dispersión de datos.”*

Figura 4-25. Propagación de mareas piezómetros San Andrés



Fuente: Findeter, 2016

En conclusión, el estudio de la isla se puede llevar en diferentes escalas temporales (anuales, diarias, horas), no obstante el comportamiento en algunas zonas es claro: en la zona de Cove la carga hidráulica presenta una alta variabilidad influenciada por las precipitaciones, mientras que las conductividades eléctricas se mantienen dentro del mismo orden de magnitud. En contraste, en la zona del centro urbano, la carga hidráulica es más estable, pero los regímenes de bombeo generan cambios drásticos en las conductividades eléctricas. Cerca de la línea de costa, los niveles piezométricos se mantienen próximos a 0 y con poca variabilidad.

4.4.1.2. Superficie Piezométrica

La superficie piezométrica representa el nivel de presión del agua en un acuífero y se expresa mediante isopiezas, que conectan puntos con igual nivel piezométrico. En acuíferos libres coincide con el nivel freático, mientras que en acuíferos confinados puede estar por encima del techo del acuífero.

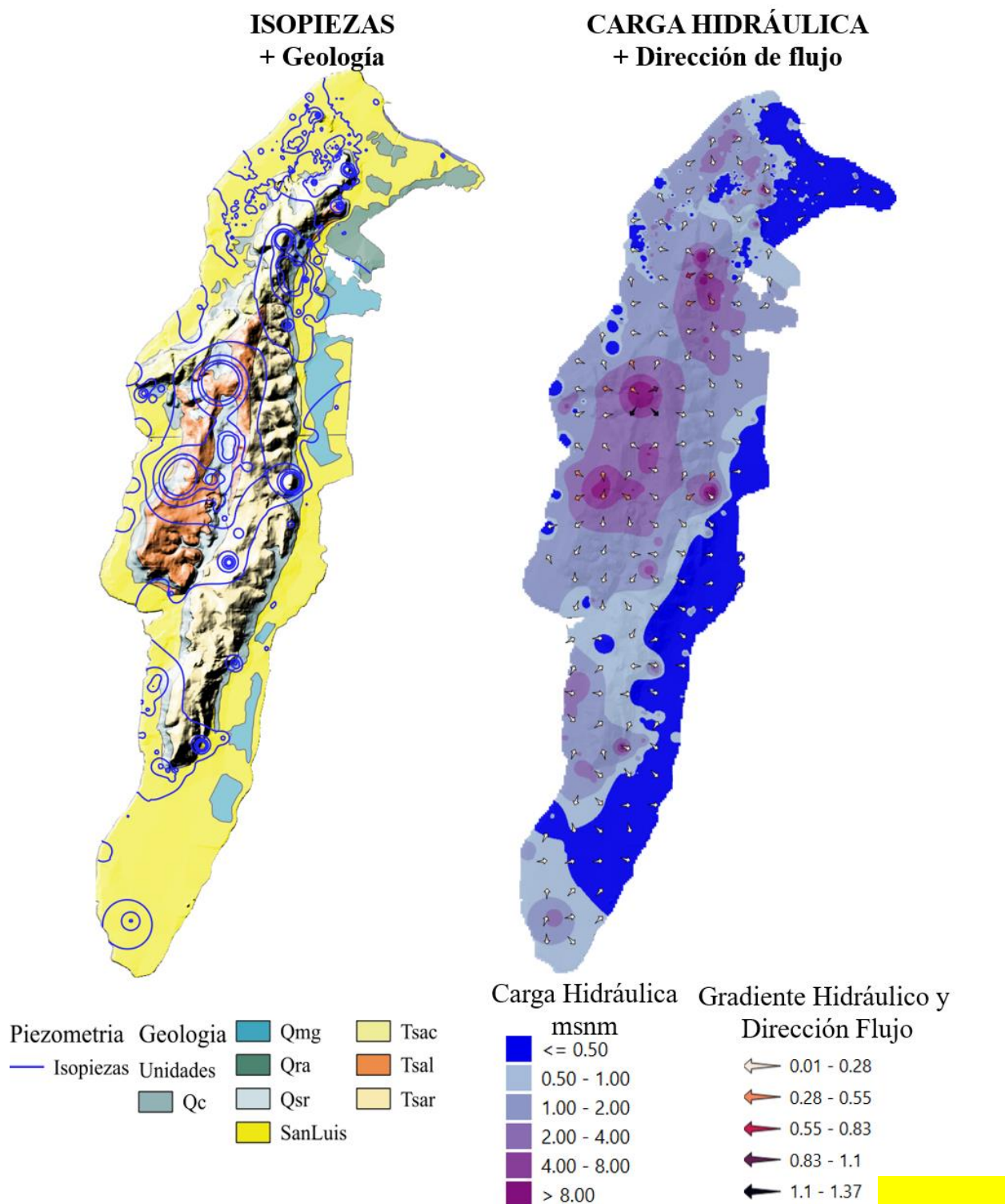
Para el caso de San Andrés, se elaboró la superficie piezométrica de enero y febrero de 2018 el cual representa el inventario con formato FUNIAS, adicionalmente se incorporó información de otras fuentes promediando los niveles registrados en los pozos concesionados durante estos meses.

La superficie fue generada mediante interpolación IDW, utilizando una malla de 30 m, como se muestra en la Figura 4-26, donde se observa la distribución de cargas hidráulicas en la isla, destacándose lo siguiente:

- En el área de Cove se registran los valores más altos, superiores a 4 m s. n. m. Esto podría estar relacionado con la geología del sector, donde aflora la Formación San Andrés (Tsal). Como se mencionó en los capítulos 4.2.1 (estratigrafía) y 4.2.3 (geología local) de este documento. Esta formación presenta una mayor proporción de arenas y arcillas, lo que probablemente reduce la conductividad hidráulica en comparación con las calizas fosilíferas y fracturadas de otras zonas.
- En las cercanías del muelle y el manglar, donde se identifican zonas de alta conductividad próximas al contacto entre las tres unidades de la Formación San Andrés y la Falla San Andrés. Con menor intensidad, en la zona urbana centro-occidental también se observan niveles piezométricos elevados.
- En el centro-occidente de la isla, así como en gran parte de San Luis y el occidente, los niveles piezométricos son inferiores a 0.5 m, lo que sugiere una relación directa con el nivel del mar.
- Hacia el lado sur se encuentra poca densidad de datos no obstante se observa que la posibilidad de niveles relativamente entre 2 a 4 msnm han sido medidos indicando una zona de almacenamiento.

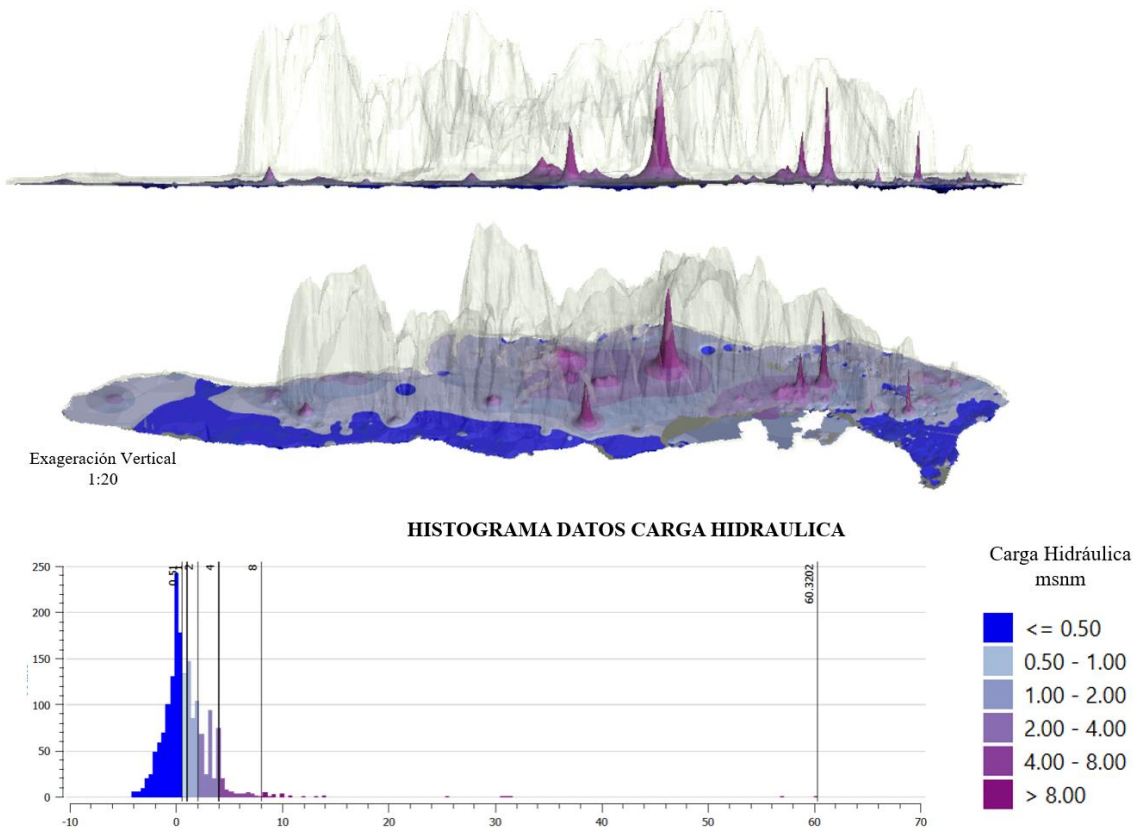
La Figura 4-27 presenta la comparación entre la superficie piezométrica y la topografía donde se observa que los niveles piezométricos son significativamente más bajos en relación con las alturas del terreno, alcanzando un máximo de 12 m s. n. m.

Figura 4-26. Isopiezas y carga hidráulica San Andrés 2018



Fuente: Elaboración propia, Compilado de: Geología (Vargas) y Coralina

Figura 4-27. 3D superficie piezometría vs superficie topográfica e histograma de cargas



Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se identifican datos atípicos en algunas zonas que se evidencian en las 2 (dos) figuras anteriormente descritas lo que sugiere la presencia de posibles capas colgadas, ya que estas zonas se correlacionan con los altos hidráulicos subterráneos, aunque también existe la posibilidad de que sean errores de medición.

4.4.2. Parámetros hidráulicos

En esta sección se presentan los datos de los pozos que cuentan con diseños (ubicación de los ranurados y el análisis de los datos de conductividad hidráulica obtenidos de información secundaria.

4.4.2.1. Ranurados

De los 2,071 pozos que cuentan con algún tipo de información hidrogeológica en la isla (*esta cantidad recopilada según información secundaria para el estudio, sin embargo, Según información de Coralina, un estudio de la secretaria de Salud generó un inventario de cerca de 6000 puntos de agua subterránea*), solo 57 cuentan con registros litológicos, y de estos, únicamente 13 tienen información sobre la ubicación de ranurados (como se muestra en la

Figura 4-28). Estos pozos se concentran en la región central, 10 ubicados en El Cove y 3 en la zona centro oriental.

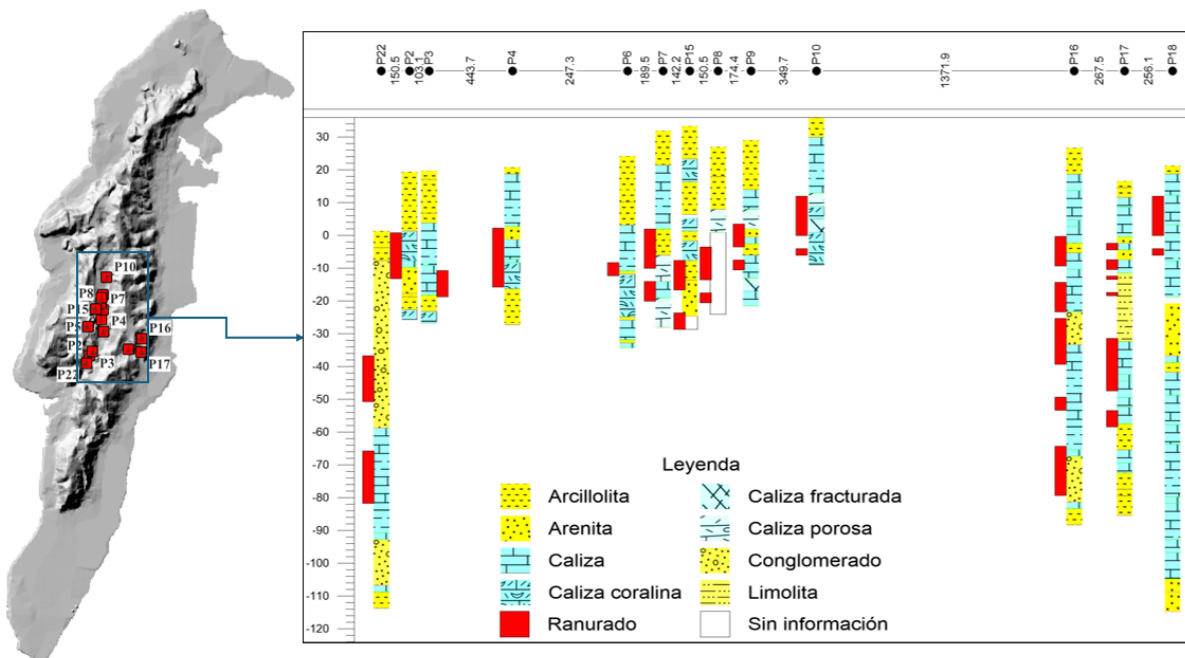
En El Cove, los ranurados se encuentran a profundidades inferiores a -30 msnm, y los pozos presentan cotas superiores a 19 msnm, excepto el pozo P22, que está situado más al sur y tiene una cota de 1.27 msnm. Este pozo cuenta con dos zonas de ranurado, siendo la más profunda de aproximadamente -80 msnm.

Por otro lado, los pozos P16, P17 y P18, ubicados en el sector centro oriental, se encuentran más cerca de la costa. Estos pozos alcanzan profundidades de hasta -113 msnm. Los pozos P16 y P17 presentan múltiples ranurados, con profundidades que llegan a -70 msnm, mientras que el pozo P18 tiene dos ranurados, siendo el más profundo de -10 msnm.

En general, los ranurados se localizan principalmente sobre calizas coralinas y calizas coralinas fracturadas, aunque también se observan algunos sobre arenitas. Cabe destacar que tanto la información geológica de los pozos como la de los ranurados es limitada, representando menos del 1% del total de pozos con esta información disponible.

Es importante resaltar que los pozos en la zona del Cove (Formación San Andrés) aún están activos extrayendo agua con características aceptables de salinidad (Figura 4-28), son aquellos que presentan ranurados en una cota menor a -30msnm. Lo que puede ser un indicador de la ubicación de la interfaz o la zona de mezcla entre el agua dulce y agua subterránea salobre.

Figura 4-28. Perfil de pozos con información de ranurado.



Fuente: Elaboración propia

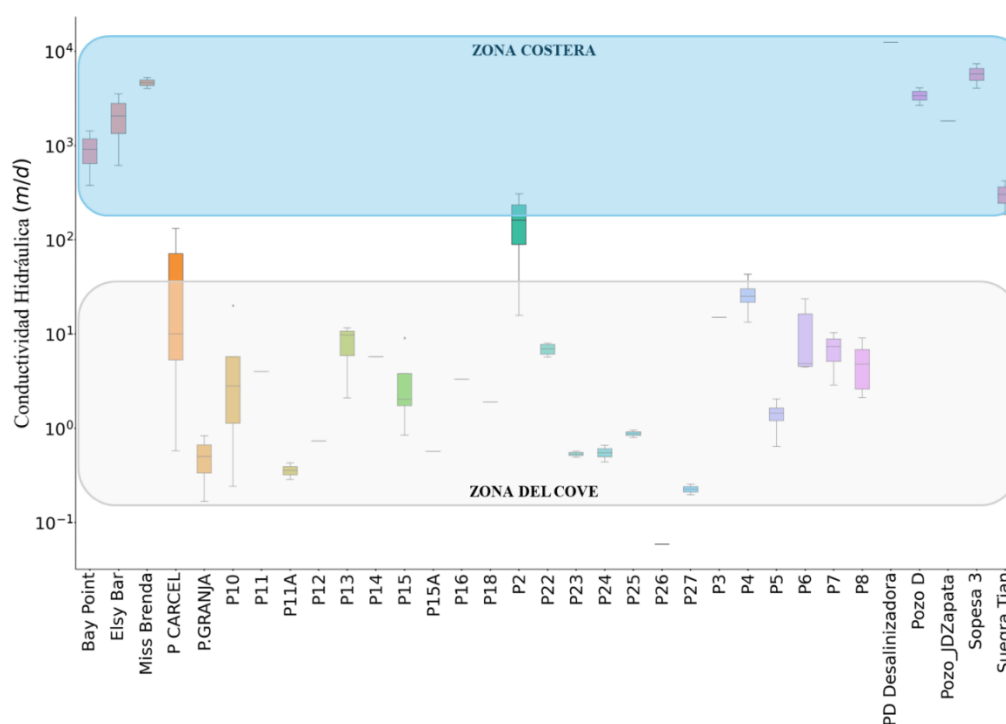
4.4.2.1. Conductividad hidráulica

Se cuentan con 83 registros de conductividad hidráulica provenientes de interpretaciones de pruebas de bombeo en 33 pozos¹ productivos (menos del 1% de los pozos productivos inventariados en la Isla).

En la Figura 4-29 se presenta la distribución espacial de los valores de conductividad hidráulica, donde se observa que los valores cercanos a la costa en la formación San Luis presentan valores elevados de conductividad hidráulica (>1000 m/día), siendo resultados con la litología de las rocas de la formación que son calizas coralinas y/o fracturadas o con presencia de Karst, que permiten una conexión directa con el agua de mar. Es decir, una unidad conductiva, pero con pozos de extracción de agua salada.

En la zona del Cove (Parte Alta de la Isla) es la otra zona que concentra datos de conductividad hidráulica que provienen de pruebas de bombeo los pozos del acueducto en la formación San Andrés. Cuyos valores de conductividad hidráulica varía entre 0.5 a 30 m/día, hidrogeológicamente se deduce que la formación San Andrés compuesta de calizas clásticas es una unidad competente para transmitir el agua, sin embargo, como se ha dicho anteriormente la principal limitación a la extracción de agua es la ubicación de la zona de mezcla entre el agua dulce y el agua salobre. (Ver Figura 4-29 y Figura 4-30)

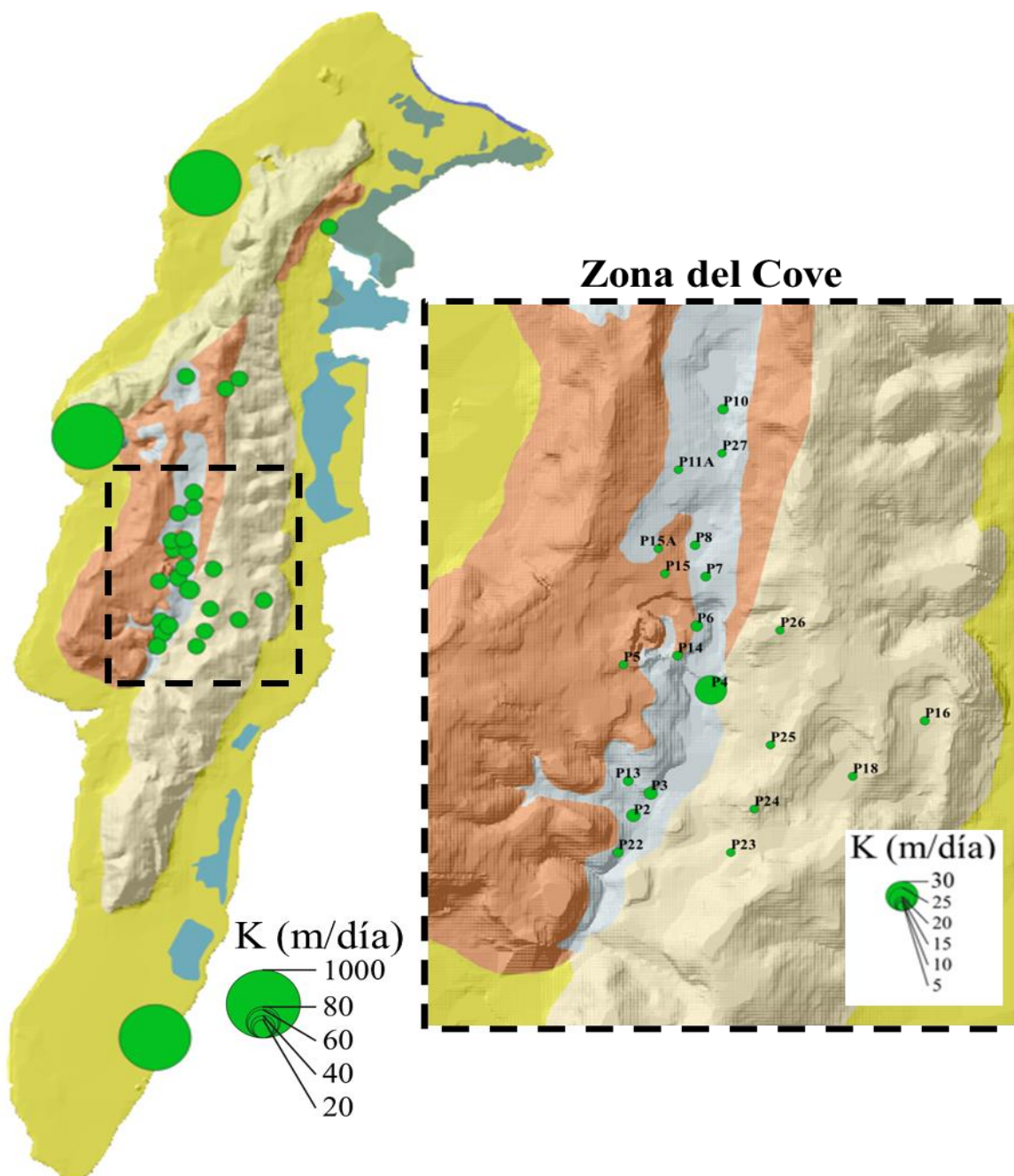
Figura 4-29. Diagrama de caja de conductividad hidráulica



Fuente: Elaboración propia

¹ No se cuenta con los datos crudos de las pruebas de bombeo

Figura 4-30. Distribución espacial de los valores conductividad hidráulica



Fuente: Elaboración propia

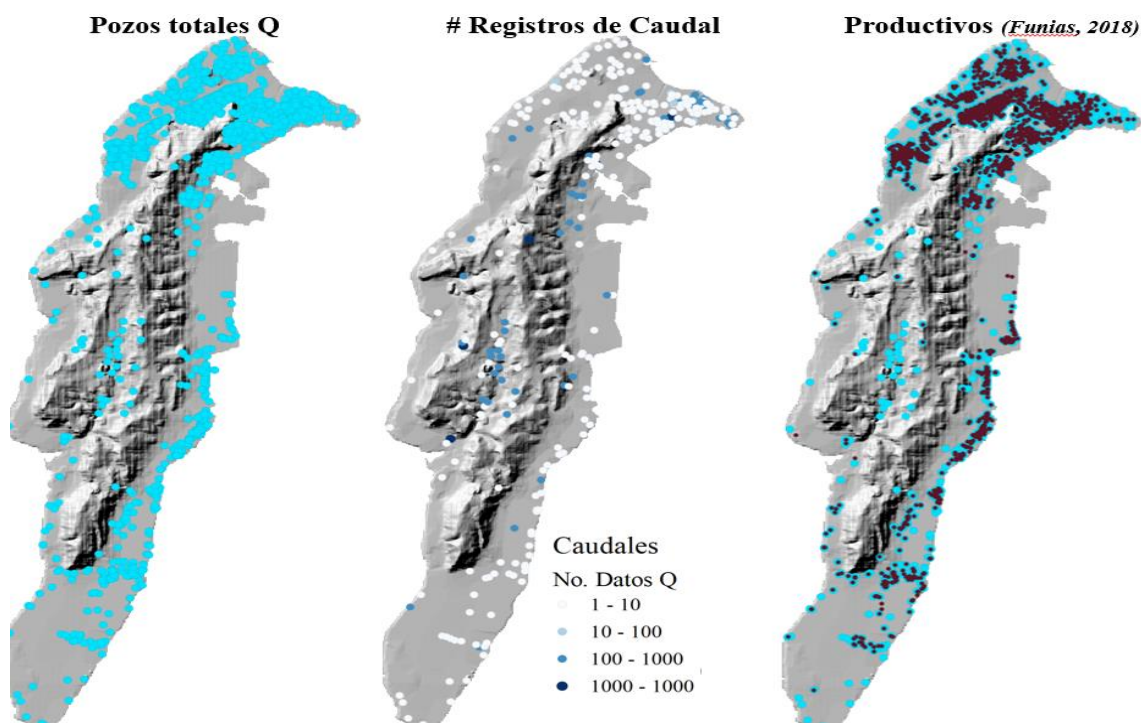
4.4.3. Caudales de extracción

De los 2,071 pozos en la isla con información para este estudio, 2045 se reportan como productivos según el **inventario de puntos con formato FUNIAS** entre 2017 y 2018. Es importante, resaltar que la mayoría de los pozos extracción son de uso doméstico con caudales bajos (inferiores a 1 L/s) y someros. Sin embargo, únicamente 290 cuentan con algún registro histórico de caudal de extracción, es decir que en 90% de los pozos productivos de la isla no se contabiliza la extracción de agua subterránea (Salada o dulce), pero en ellos se encuentran los pozos con mayor caudal de extracción tales como los de abastecimiento del acueducto o la planta desalinizadora y otros de uso comercial.

En la Figura 4-31 se presenta la distribución de los pozos con caudales de extracción. Se puede observar que en la zona norte (casco urbano) y por toda la línea de la costa oriental (San Luis) existe una gran concentración de estos pozos. Siendo coherente con el inventario de puntos de agua la profundidad promedio de estos pozos es 12 m aproximadamente.

En la Tabla 4-6 se presentan los 23 pozos concesionados por Coralina (2024), los cuales constan de los 13 pozos del acueducto en la zona del Cove cuyo caudal concesionado no supera los 6 L/s, los 4 pozos de la planta de desalinizadora con un caudal de 140 L/s que por estar ubicados en la formación San Luis (Calizas Coralinas) y cercanos a la costa están completamente conectados con el mar y finalmente, 6 pozos del sector comercial y hotelero cuyo caudal concesionado no sobre pasa los 5 L/s.

Figura 4-31. Perfil de pozos con información de ranurado.



Fuente: Elaboración propia

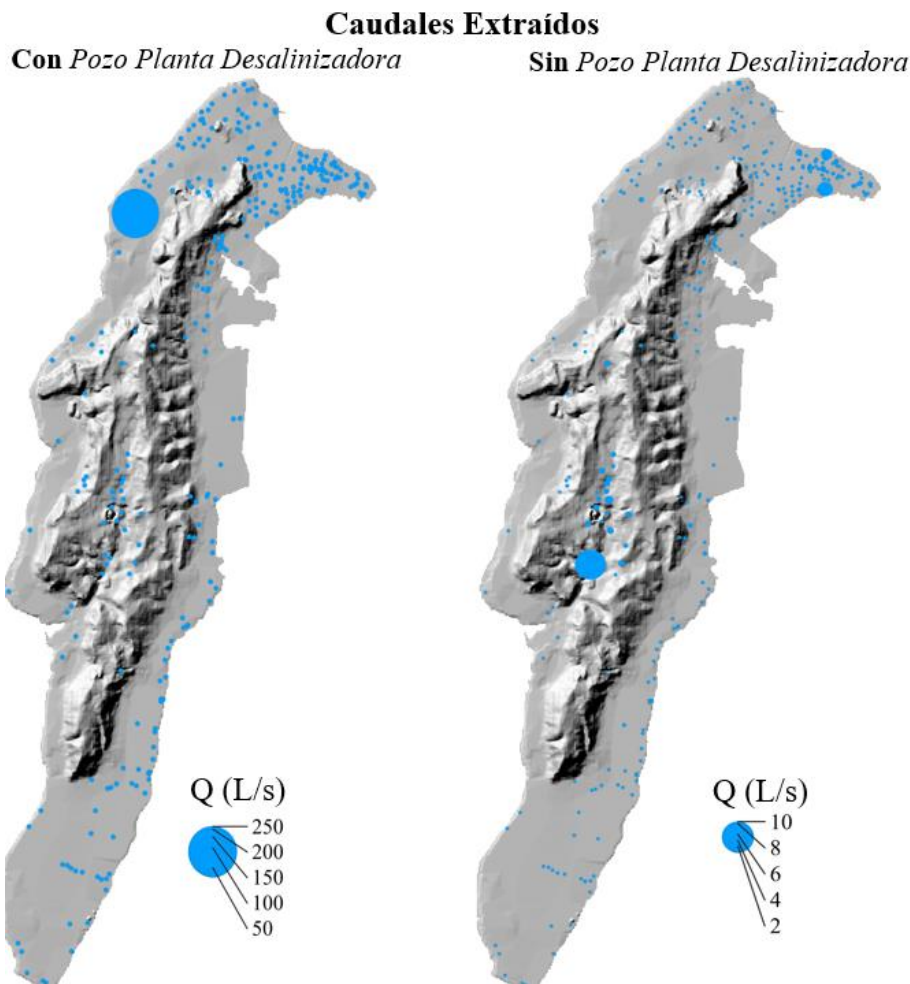
Tabla 4-6. Pozos concesionados por Coralina 2024

Pozo Concesionado	USO	Q (L/s)	Régimen Bombeo (h/día)
PC3	Acueducto	2.5	24
PC4	Acueducto	4.5	24
PC6	Acueducto	1.5	12
PC7	Acueducto	3	24
PC8	Acueducto	3	24
PC10	Acueducto	6	24
PC13	Acueducto	3	24
PC14	Acueducto	1	6
PC15	Acueducto	1	12
PC15A	Acueducto	1	18
PC23	Acueducto	1.5	12
PC25	Acueducto	1	12
PC27	Acueducto	1	12
PC18	Comercial	5	9
PC38	Hotelero	0.1	5
PC39	Hotelero	1.22	9.037
PC49	Hotelero	0.3	
PC52	Comercial	1.8	10
PC71	Hotelero	5.94	4
PCA Desalinizadora (Qplanta)	Acueducto	140	24
PCB Desalinizadora (Qplanta)	Acueducto	140	24
PCC Desalinizadora (Qplanta)	Acueducto	140	24
PCD Desalinizadora (Qplanta)	Acueducto	140	24

Fuente: Elaboración propia

Respecto a la información histórica de caudales, en la Figura 4-32 se presenta su distribución espacial. Donde se observa que los pozos en su mayoría no superan los 10 L/s históricamente (salvo los pozos de la planta desalinizadora), algunos ubicados en la zona nor-oriental de la isla y por supuestos los pozos de la zona del Cove.

Figura 4-32. Caudales de extracción – información histórica

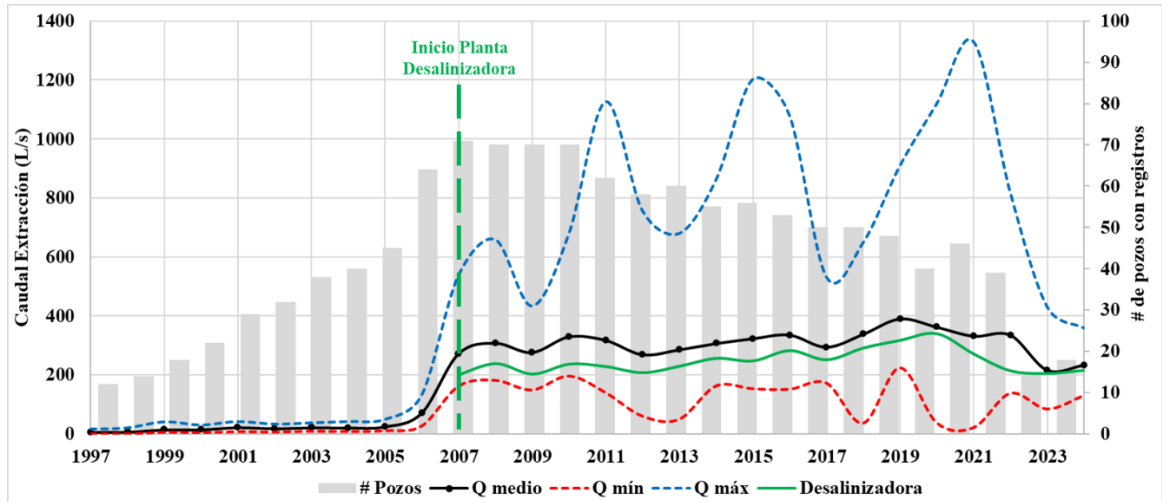


Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4-33 se presenta la evolución histórica de los registros de caudal de extracción, los cuales constan principalmente de concesiones. En él se observa que a partir de 2007 inició los registros de los pozos de la planta desalinizadora se aumentó considerablemente la extracción. Sin embargo, como se ha dicho antes estos están prácticamente conectados con el mar. Es decir que la extracción “contabilizada” de agua subterránea de agua dulce o poco salobre se ha mantenido sobre los 25 L/s.

También, se observa una importante reducción en la información de caudales de extracción de los últimos 3 años, pues, aunque los pozos concesionados son 23, se cuentan con registros en menos de 20.

Figura 4-33. Gráfico de caudales de extracción – información histórica



Fuente: Elaboración propia

4.4.4. Zonas de recarga y descarga

Estudios anteriores mencionan que la recarga proviene de la infiltración generada por la precipitación en la cuenca del Cove (INGEOMINAS, 1998; Huguett, 1989; INGEOMINAS, 1998; Riveros, 1996), junto con los reservorios representados principalmente por el BigPond, generando así una entrada gradual al sistema. Esto es coherente con la piezometría descrita en esta zona y con la descripción geológica. El agua de características “dulces” discurre subterráneamente descargando en la zona de costa. Esto es de suma importancia para el control de la intrusión salina. Así mismo, esta agua “dulce” en la zona de descarga es la fuente de abastecimiento de la gran cantidad de barrenos de las casas localizadas en la línea de costa.

Para diferentes autores citados en la siguiente tabla esta se encuentra entre 400 a 800 mm/año.

Tabla 4-7. Recarga calculada por diferentes trabajos en San Andres

Trabajo	Recarga (mm/año)
Lemoine, 1987	416
Huggeth, 1989	342
Bonilla, 1962	416
Ángel, 1993	608
INGEOMINAS, 1993	808
INGEOMINAS, 1997	686
Vargas et al, 1997	520
IGAC, 1998	398
Amaya et al, 16	437

Fuente: Universidad Nacional, 2010

4.5. Características hidrogeoquímicas

Las características hidroquímicas del sistema hidrogeológico se pueden estudiar desde varias perspectivas: iones mayoritarios, fisicoquímicos (parámetros básicos) y calidad del agua.

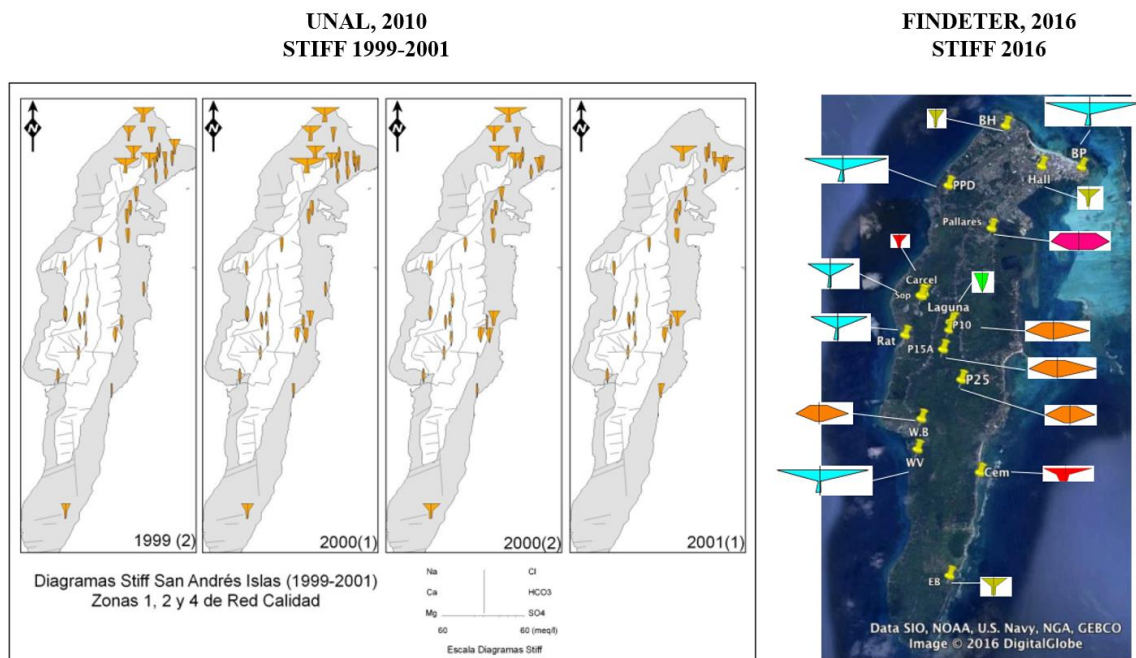
Dado lo anterior y sumado a los objetivos de este estudio se realiza una descripción de los iones mayoritarios y se evalúa la intrusión marina a partir de datos fisicoquímicos de conductividad eléctrica.

4.5.1. Iones mayoritarios

El monitoreo de aniones y cationes mayoritarios en aguas subterráneas es fundamental para caracterizar su composición química y comprender su origen, evolución e interacción con el medio geológico. Estudios previos, como los de Ingeominas (1997), Unal (2010) y Findeter (2016), han evaluado la distribución de estos iones en la isla, destacando el uso de diagramas de Stiff en los dos últimos estudios/autores para analizar su comportamiento espacial.

Los resultados de estos estudios muestran una tendencia general hacia mayores concentraciones de Cl y Na+K en el centro urbano y a lo largo de la línea de costa, lo que indica una fuerte influencia del agua marina. En contraste, en la cuenca de Cove, las aguas subterráneas presentan una alta concentración de HCO₃ y Ca, reflejando la interacción con formaciones calizas del entorno y tiempos de residencia cortos.

Figura 4-34. Diagramas de Piper año 1999-2001 y 2016

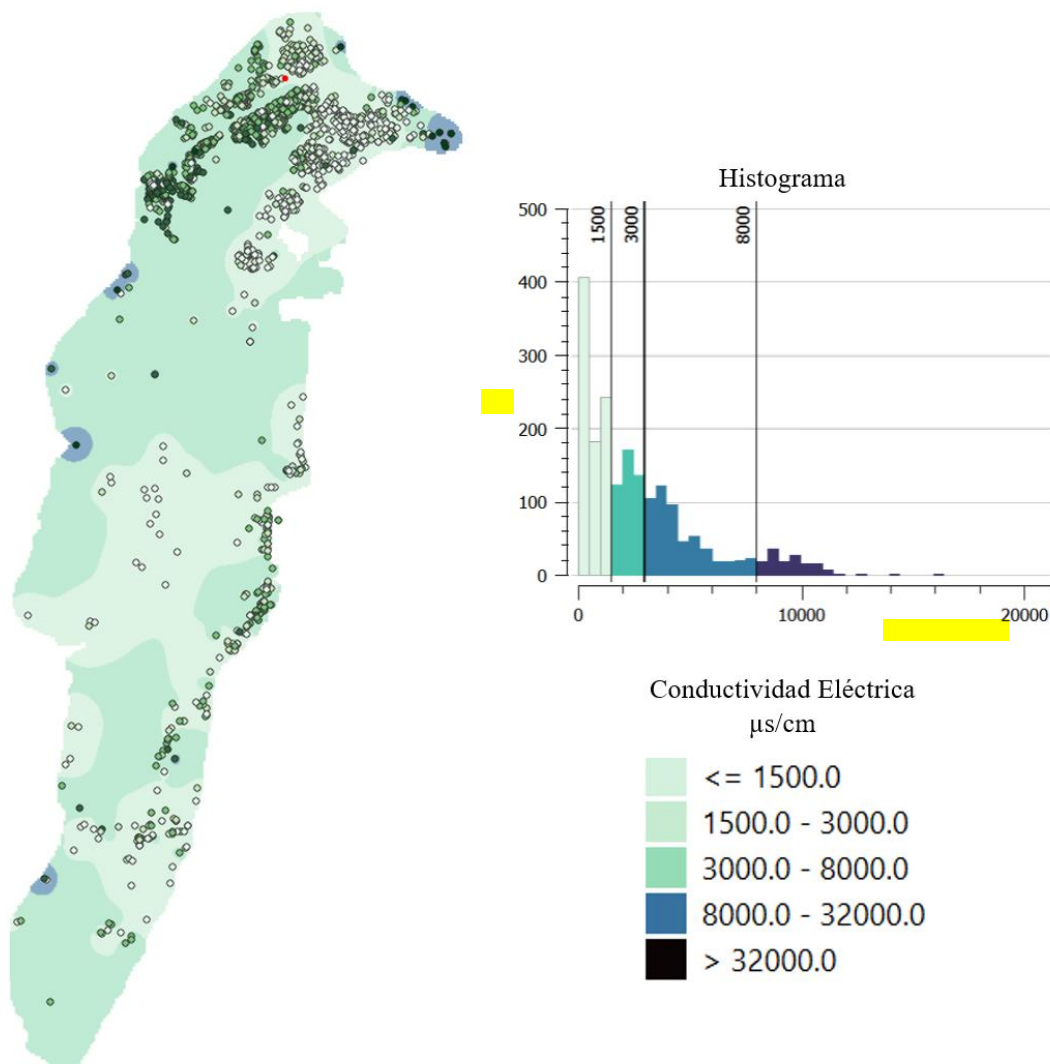


Fuente: Unal 2010, Findeter 2016

4.5.2. Intrusión marina

La intrusión marina se analiza a partir de la conductividad eléctrica, un parámetro medido a lo largo del tiempo y con una amplia distribución espacial en la isla. Para este estudio, se elaboró la distribución espacial de la conductividad eléctrica correspondiente a enero y febrero de 2018, basada en el inventario con formato Funias. Adicionalmente, se incorporó información de otras fuentes, promediando las conductividades registradas en los pozos concesionados y piezómetros durante estos meses. La superficie fue generada mediante interpolación IDW con una malla de 30 m, como se muestra en la Figura 4-35.

Figura 4-35. Distribución espacial 2D conductividad eléctrica



Fuente: Grafica generada a partir de la información entregada por Coralina

De manera general, se observa una alta concentración de puntos en el norte de la isla. En el centro, las aguas subterráneas presentan conductividades inferiores a 3000 µS/cm, con una

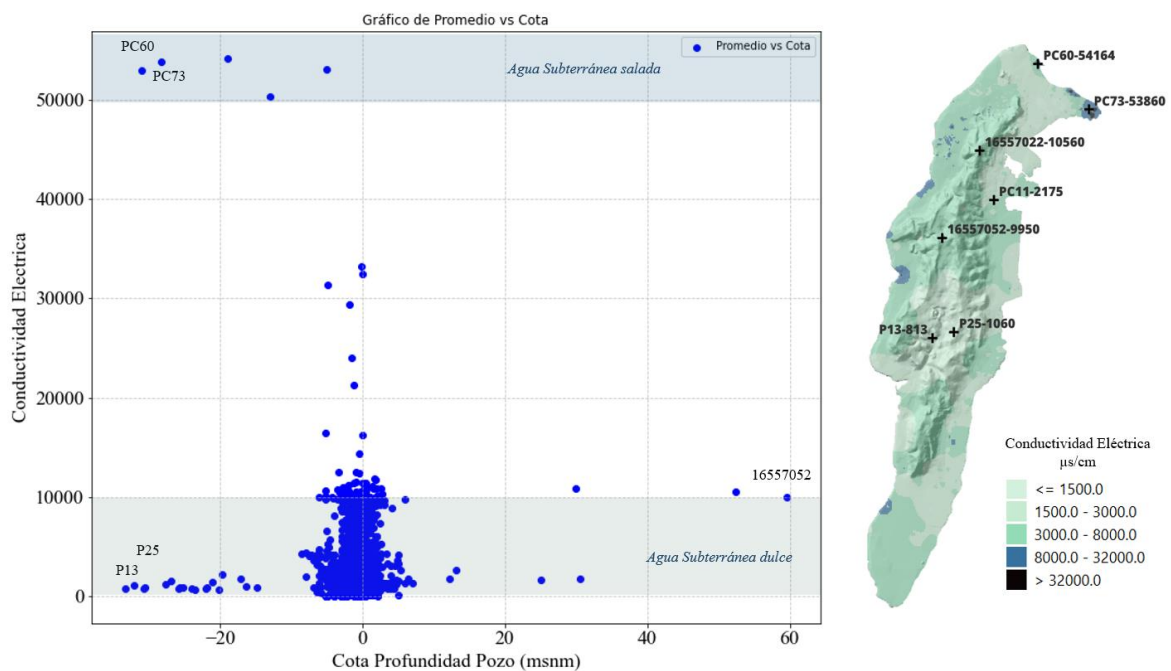
tendencia a disminuir hacia el centro urbano y aumentar significativamente en dirección al aeropuerto. Asimismo, se identifican zonas de mayor conductividad eléctrica en proximidad a la costa.

De la misma manera hacia el área de Cove se observa zonas menores inferiores a 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ que parece que se extienden hacia la descarga de la cuenca hidrográfica del Cove y la zona de manglares. Es importante destacar que este análisis bidimensional (2D) no considera la profundidad de medición

Dado que se analiza un problema tridimensional (3D) y que la caracterización más cercana a la realidad depende de la profundidad de los ranurados, se optó por tomar la profundidad reportada de cada pozo y evaluarlo en la cota mínima, en función de que se conoce poco de los diseños de los pozos.

Esto se presenta en la Figura 4-36 donde se relaciona en un gráfico de dispersión la conductividad eléctrica contra la cota de profundidad. Se observa que la mayoría de los pozos extraen agua de cotas próximas al nivel del mar, con una concentración de datos en el rango de 0 a 10000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Figura 4-36. Distribución espacial 2D conductividad eléctrica



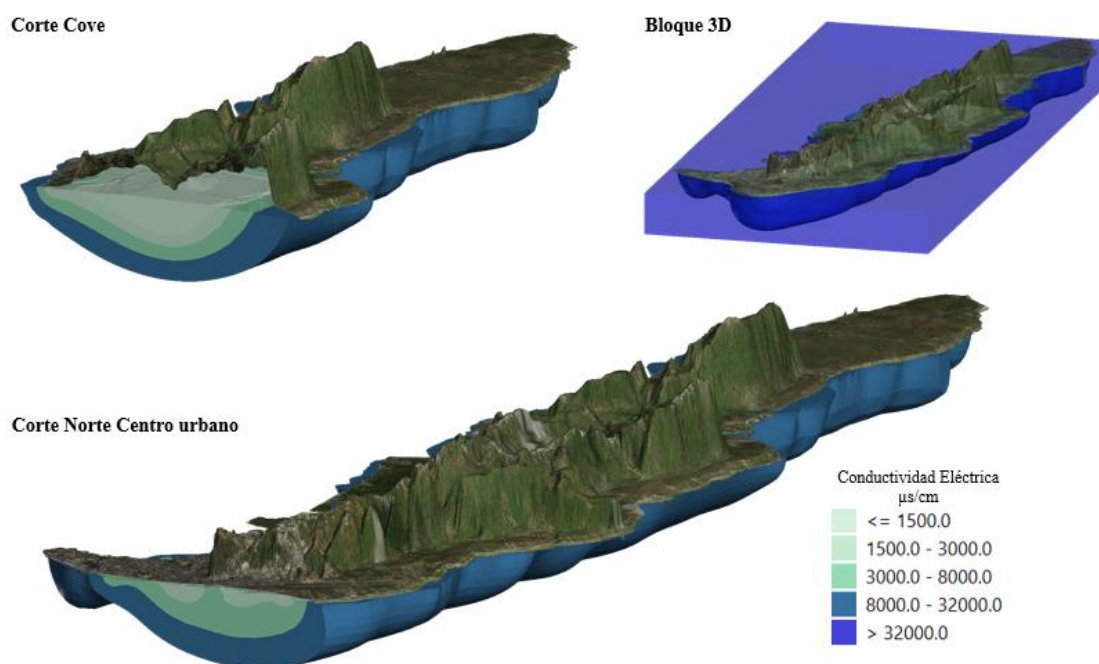
Fuente: Grafica generada a partir de la información entregada por Coralina

Adicionalmente, se identifican dos grupos de pozos con alta conductividad eléctrica ($>50000 \mu\text{S}/\text{cm}$). El primero corresponde a aquellos ubicados a lo largo de la línea de costa, como PC-60 y PC-73, que extraen agua altamente conductiva. El segundo grupo incluye pozos con cotas inferiores al nivel del mar, como P-13 y P-25, que también presentan altos valores de conductividad. Posteriormente, se observa que algunos pozos en zonas con cotas relativamente altas, como el ubicado en la zona 16557052, muestran conductividades

elevadas, un comportamiento que no se ajusta a una zona de recarga, estos datos atípicos pueden ser procesos de transporte más lentos o mediciones erráticas.

La evaluación de un modelo de distribución de conductividad en 3D se presenta en la Figura 4-37 con perfiles para diferentes zonas, esto permite un acercamiento visual a la determinación del volumen de agua dulce disponible no obstante como se mencionó anteriormente existen fuertes limitantes en la ubicación espacial de los datos en profundidad, así como algunas zonas donde existen vacíos de información.

Figura 4-37. Distribución espacial 3D esquemática



Fuente: Elaboración propia

4.6. Formulación modelo conceptual

El sistema hidrogeológico está compuesto calizas detríticas de las formaciones San Luis y San Andrés, que exhiben una porosidad múltiple (Primaria, fracturada, y kárstica). De acuerdo con la estratigrafía y litología el área del Cove presenta mayor cantidad de materiales clásticos que promueven el almacenamiento y un tránsito más lento que en las calizas con porosidad secundaria (disueltas y fracturadas).

Los resultados de pruebas hidráulicas señalan un medio bastante heterogéneo, con pruebas en la formación San Andrés indicando una conductividad hidráulica media de 6 m/d, lo que refleja una unidad competente para transmitir el agua, sin embargo, la principal limitación a la extracción de agua es la ubicación de la zona de mezcla entre el agua dulce y el agua salobre.

Los niveles fluctúan en función de la precipitación en escalas diaria y mensual, evidenciando dos comportamientos diferenciados: por un lado, en la zona montañosa y de piedemonte, se observa un aumento de la carga hidráulica asociado a eventos de precipitación; por otro, en la zona costera, los niveles se mantienen relativamente constantes, con fluctuaciones de pocos centímetros a escala hora, influenciadas principalmente por la marea.

En términos de hidroquímica, se observa influencia de la intrusión marina, especialmente en áreas de topografía más baja que coinciden con la Formación San Luis.

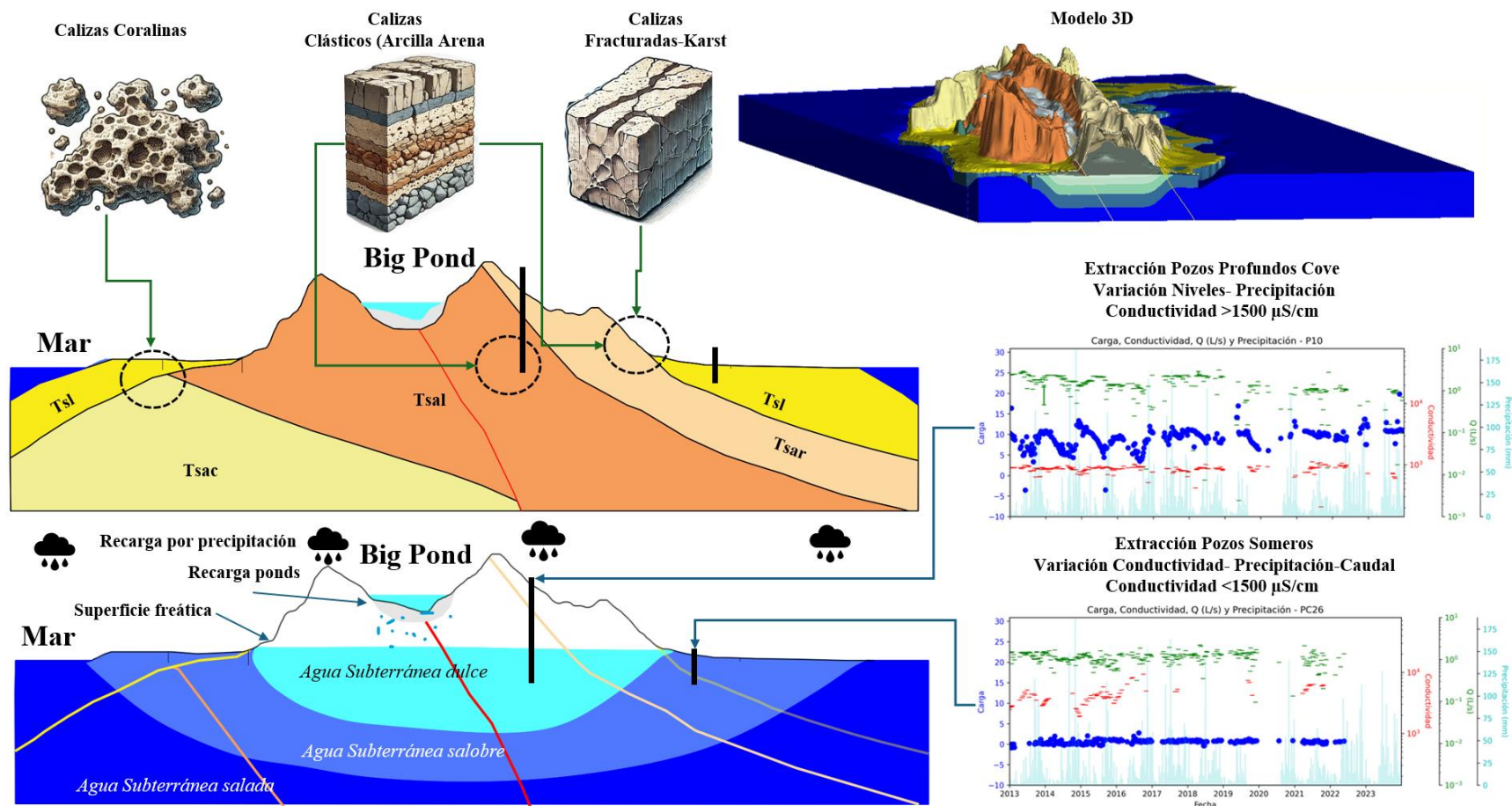
La recarga de agua se concentra principalmente en las zonas elevadas, siendo responsable de la infiltración de agua dulce no obstante efectos de disolución de agua salobre se presentan en las zonas costeras indicando que existe recarga en estas zonas, cabe destacar que la extracción de agua de los pozos impacta significativamente en la posición de la zona de transición entre el agua de mar en la zona urbana, mas no en la zona del cove.

A partir de las tasas de bombeo se observa que el sistema se encuentra en equilibrio, donde niveles y cargas hidráulicas se mantienen relativamente constante a necesidades de explotación del sistema.

En la Figura 4-38 se presenta la síntesis del modelo hidrogeológico conceptual descrito anteriormente

.

Figura 4-38. Síntesis Modelo Hidrogeológico Conceptual



Fuente: Elaboración propia

5. MÓDELO HIDROGEOLÓGICO NUMERICO

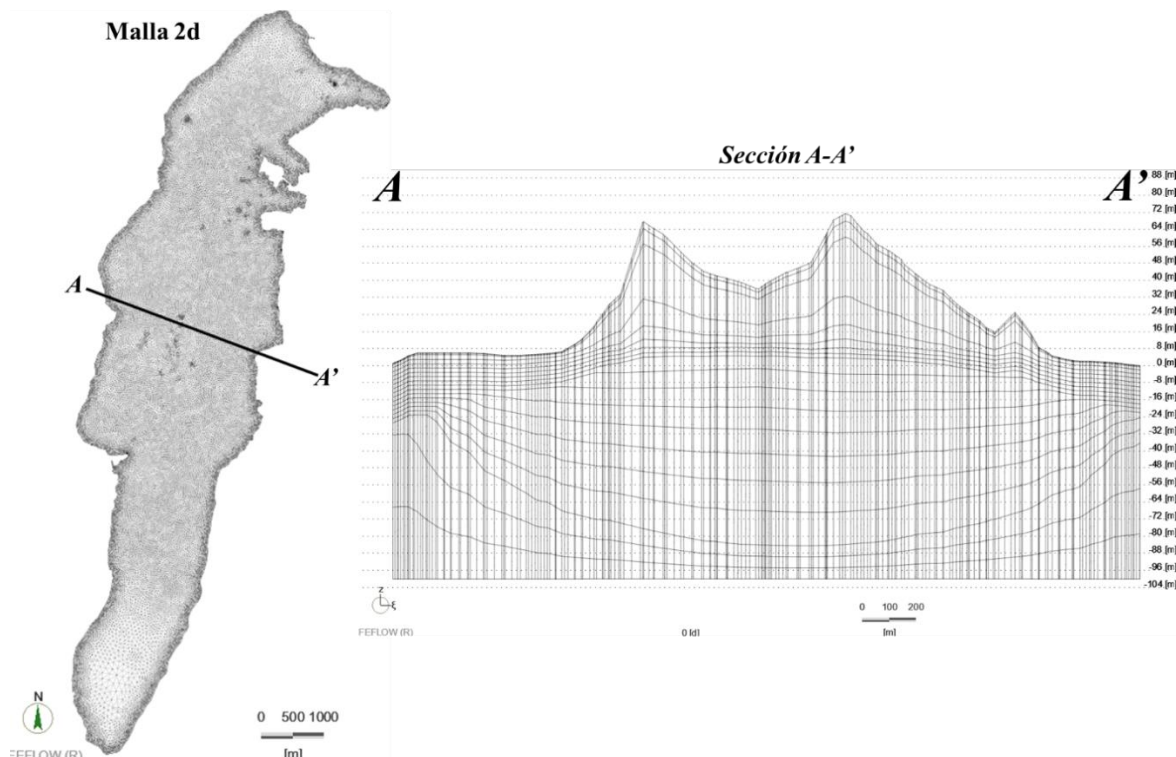
Se realizó un modelo hidrogeológico numérico de flujo y transporte en estado estacionario que representa de manera simplificada el comportamiento hidrogeológico de la isla a escala regional en términos de niveles piezométricos, intrusión marina y densidad variable.

El dominio de modelación se ha definido por la parte insular de la isla delimitada en la línea de costa. Para la construcción, simulación y calibración del modelo hidrogeológico numérico, se utilizó el software de simulación FEFLOW 8.1. Este programa implementa un código que resuelve la ecuación de flujo mediante el método de elementos finitos en tres dimensiones, en condiciones saturadas y libres. (Diersch, 2014; Trefry & Muffels, 2007)

5.1. Malla

La discretización espacial de los elementos de la malla se ha adaptado a los componentes principales como lo son: línea de costa, manglares, guiles y ponds. Las aristas de los elementos (triángulos) alcanzan una longitud mínima de 10 m hasta una máxima de 150 m, tal y como se presenta en la Figura 5-1. La malla bidimensional fue evaluada conforme a criterios de estabilidad numérica, fundamentales para garantizar la calidad del proceso de discretización espacial en modelos de elementos finitos (Delaunay y ángulos internos).

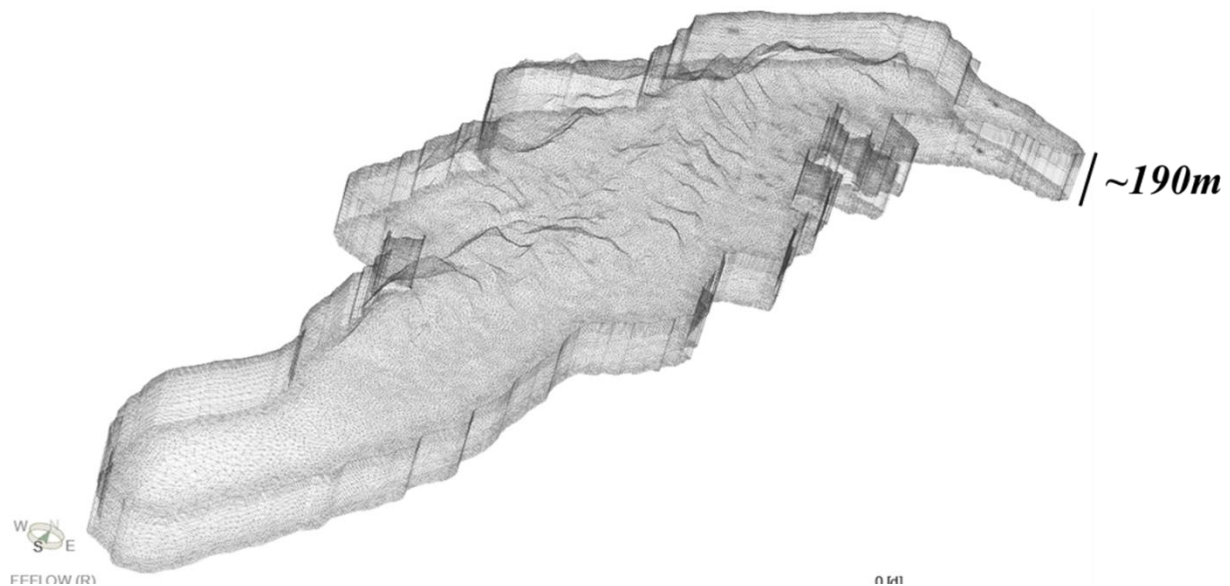
Figura 5-1 Enmallado 2D y Sección AA'



Fuente: Elaboración propia

Para la elevación de la superficie superior del dominio hidrogeológico (capa 1), se utilizó el Modelo Digital de Terreno. Archipiélago de San Andrés del IGAC de una resolución espacial de 2 metros por píxel. Las elevaciones de las primeras 10 capas del modelo se generaron como offset de la superficie del terreno hacia abajo con diferentes espesores, con el objetivo de representar adecuadamente las zonas del subsuelo que están por encima del nivel del mar, mientras que las siguientes 10 capas se le dio una forma parabólica para asemejar las formas de la interfaz agua salobre y dulce, tal y como se puede observar en la sección AA' de la Figura 5-1. La base del se estableció en -100 msnm. Se generó un volumen tridimensional compuesta de 20 capas, 859.760 nodos, y 1'586.348 elementos y en la Figura 5-2 se presenta el enmallado 3D del dominio de modelación.

Figura 5-2. Configuración malla 3D del modelo hidrogeológico numérico



Fuente: Elaboración propia

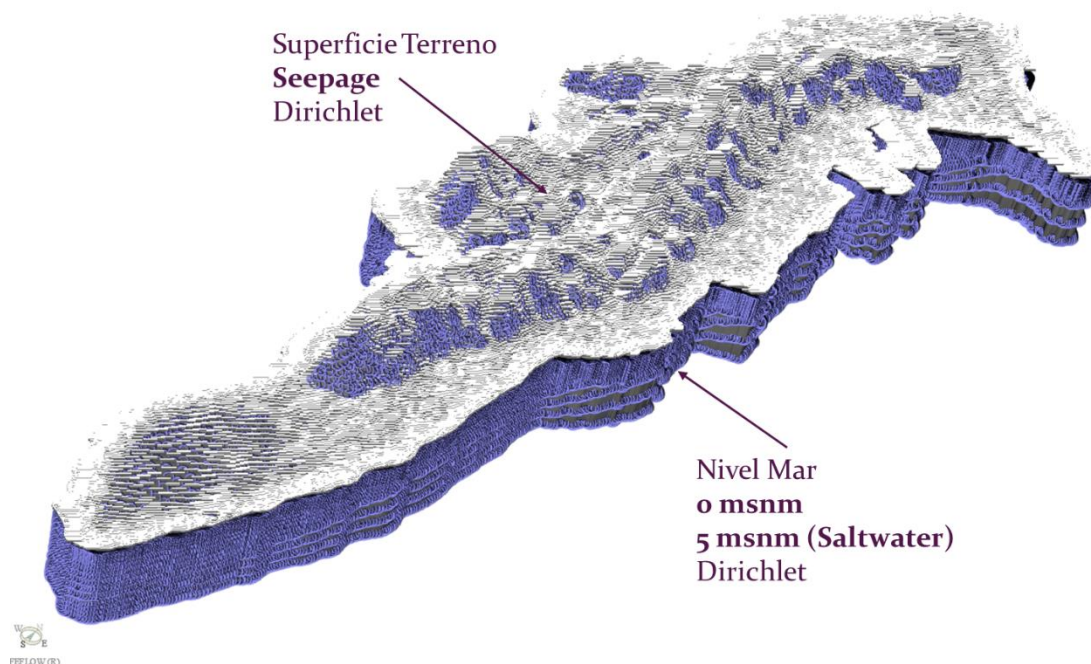
5.2. Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera (boundary conditions) constituyen un elemento esencial en la formulación de modelos numéricos hidrogeológicos de flujo y transporte, ya que definen las interacciones del sistema hidrogeológico con su entorno físico y establecen los límites del dominio de simulación. Su correcta asignación es determinante para garantizar la estabilidad numérica, el realismo del modelo y la coherencia con el modelo conceptual previamente definido (Anderson et al., 2015). Para este caso se establecieron condiciones de borde para flujo y transporte guardando coherencia con el modelo conceptual (Sección 4) y se describen a continuación.

5.2.1. Flujo

- Línea de costa: representada como carga constante de intrusión marina la condición de contorno de carga de agua salada (h) no se puede aplicar directamente como condición de contorno de la costa y tuvo que transformarse a la carga hidráulica de referencia h (DHI-WASY) con base en la siguiente ecuación: $h_s = \frac{\rho_f}{\rho_s} * h + \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_s}\right) * z$. Donde $\rho_f = 1000$ y $\rho_s = 1025 \text{ kg/m}^3$ son densidades del agua dulce y salada respectivamente y z es la elevación desde el nivel medio del mar. Para el modelo se impuso una carga constante de 5 m para el borde de la costa, tal y como se presenta en la Figura 5-3.
- En la superficie del Terreno se impuso una condición de frontera tipo *Seepage* que hidráulicamente se establece como $h_s = z$ y una restricción que permite únicamente salida de flujo $Q_s \leq 0$, Esto con el objetivo de establecer si existe aportes de agua subterránea a drenaje y/o cuerpos hídricos superficiales (ver Figura 5-3)

Figura 5-3. Condiciones de frontera flujo del modelo hidrogeológico numérico

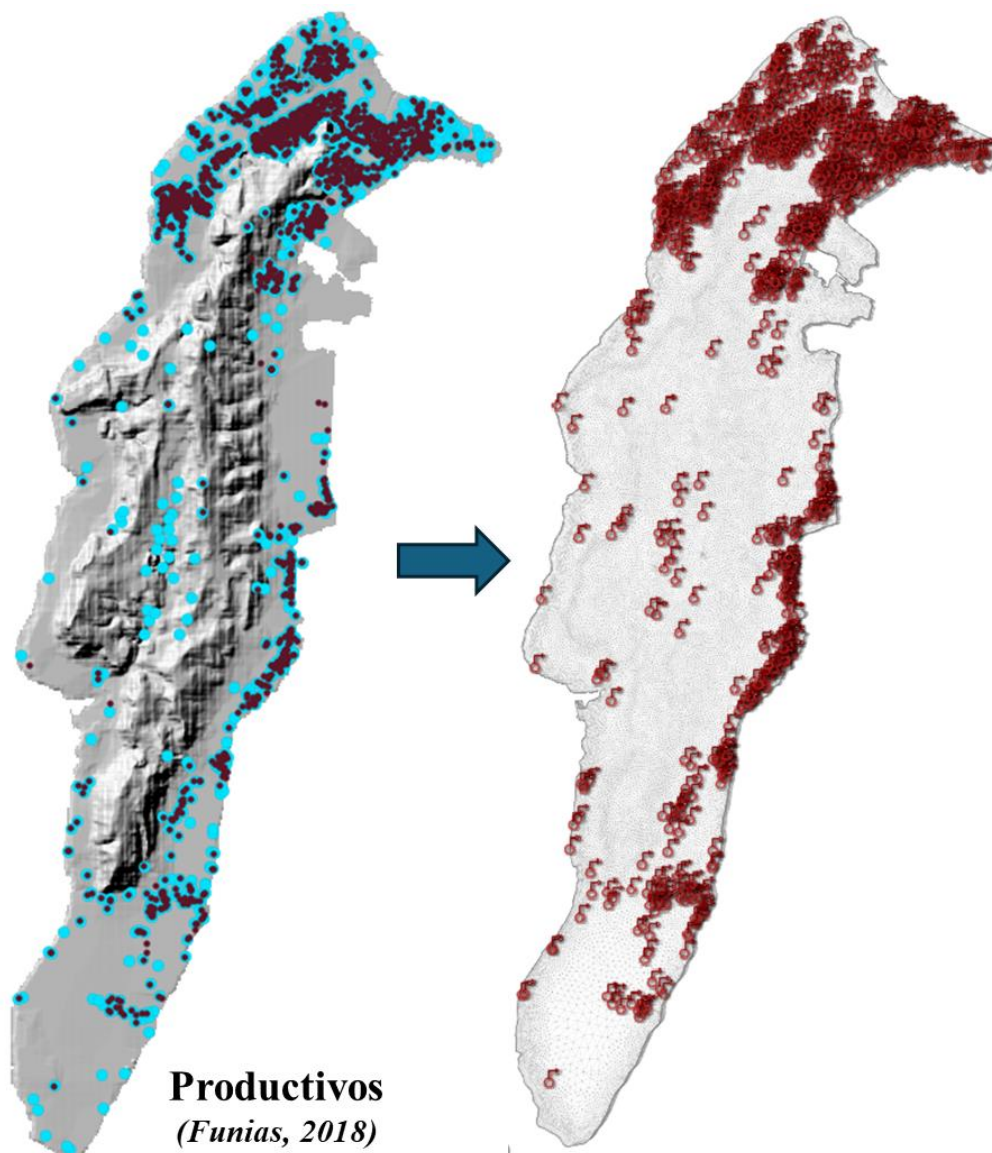


Fuente: Elaboración propia

- Pozos de bombeo: Se incluyeron los pozos 2045 que se reportan como productivos según el **inventario de puntos con formato FUNIAS** entre 2017 y 2018, debido al enmallado y el tamaño de los elementos, se sumaron algunos puntos que están dentro del área de un mismo elemento y se impuso la sumatoria de los caudales en el nodo más cercano. Como se indicó en la sección 4.4.3 Caudales de extracción, únicamente

se cuenta con 240 puntos con valores de caudales de extracción, debido a esto, para los puntos sin información se impuso un caudal 0.1 L7s (promedio de todos los datos), en la Figura 5-4 se presenta la implementación de los pozos de bombeo en el modelo numérico.

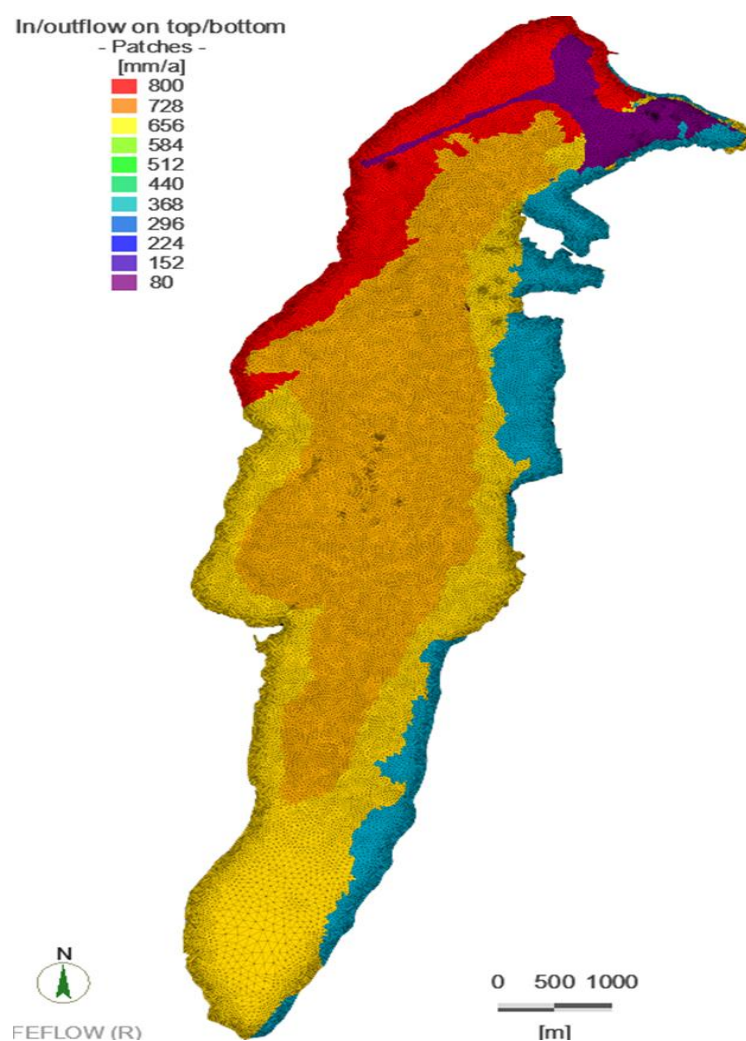
Figura 5-4. Pozos de bombeo modelo numérico – Izquierda: Inventario funias (2018), derecha: implementación modelo numérico Feflow.



Fuente: Elaboración propia

- La recarga al sistema hidrogeológico fue implementada mediante una condición de frontera de flujo vertical aplicado en superficie, asignada a los elementos de la capa superior del modelo. En FEFLOW, esta condición se configura como "in-/outflow on top/bottom" y corresponde a una condición de segundo tipo (Neumann), aplicada sobre los elementos que representan la superficie del terreno. En la Figura 5-5 se presenta la distribución espacial de la recarga calibrada que de acuerdo con las unidades aflorantes está varía entre 800 mm/año y 350 mm/año. La distribución espacial fue ajustada para excluir zonas sin contribución directa de infiltración, tales como la pista del aeropuerto y la mayoría del casco urbano del norte de la Isla.

Figura 5-5. Recarga calibrada – modelo hidrogeológico numérico



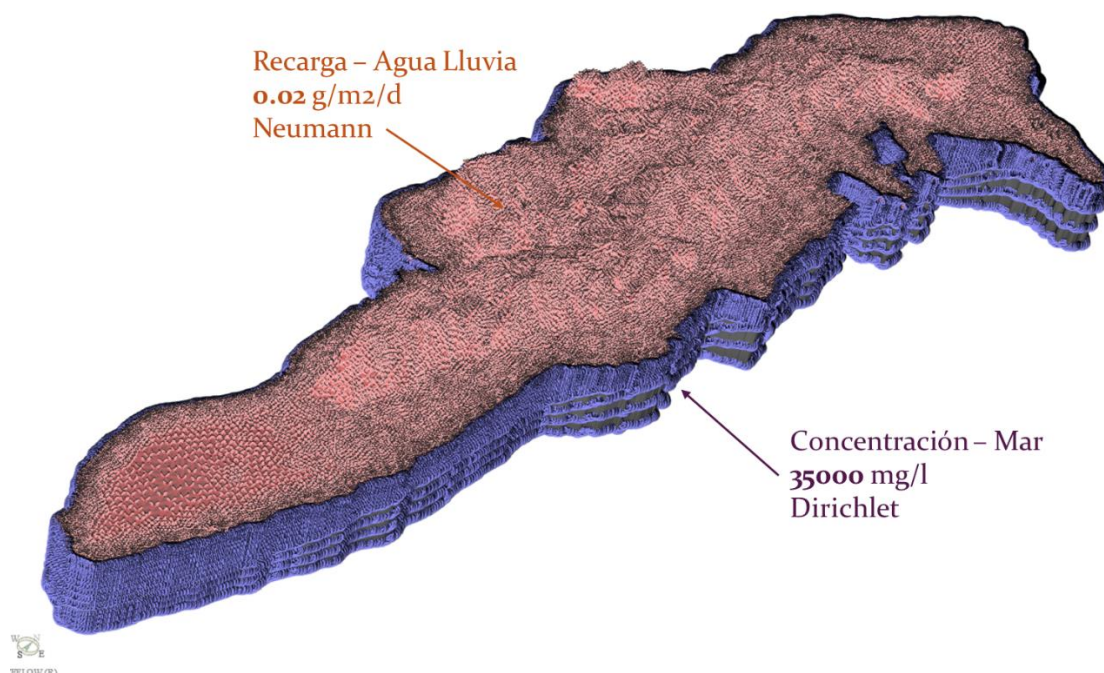
Fuente: Elaboración propia

5.2.2. Transporte

Para las condiciones de transporte se implementaron las concentraciones conocidas en el sistema hidrogeológico que se presentan en la Figura 5-6 y se describen a continuación:

- Superficie: Se estableció un flujo que corresponde a una condición de segundo tipo (Neumann) de $0.02 \text{ g/m}^2/\text{L}$ en la capa superior, donde se infiltra agua lluvia con muy poca salinidad.
- Línea de costa: Para la interfaz entre el acuífero y el agua de mar, se asignó una concentración de 35000 mg/L , este valor se obtuvo a partir de las mediciones realizadas por el SIAM
- Base del modelo: En esta zona de flujo se impuso una concentración de 35000 mg/L , suponiendo que a cotas menores de -80 msnm se encuentra ya el agua subterránea marina los cuales se fundamenta principalmente en dos aspectos:
 - Los estudios geofísicos analizados en el capítulo 4.2.4 donde Ingeominas determina una profundidad de la zona de mezcla de entre 50 y 200 m (ver Tabla 4-1)
 - Lo presentado en las perforaciones p22, p18 y p17 (ver capítulo 4.4.2.1) donde se sugiere que a -30 msnm . Puede ser una posible ubicación de la interfaz o la zona de mezcla entre el agua dulce y agua subterránea salobre.

Figura 5-6. Condiciones de frontera Transporte del modelo hidrogeológico numérico



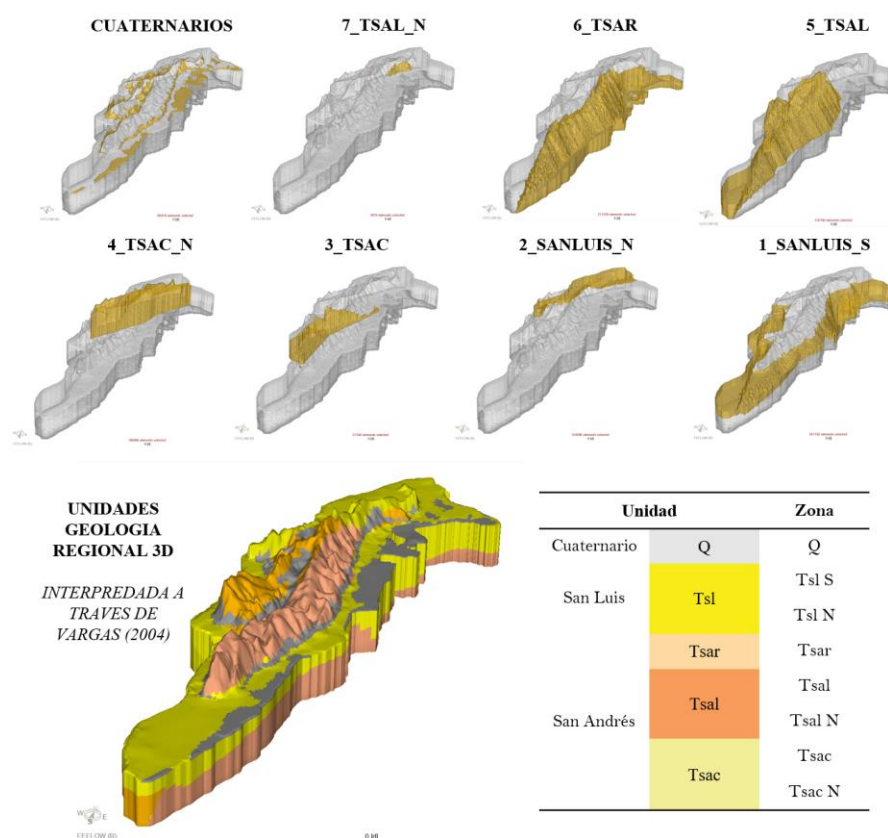
Fuente: Elaboración propia

5.3. Parametrización

La parametrización del modelo hidrogeológico numérico consiste en asignar propiedades hidráulicas a las diferentes zonas del modelo en función de la distribución, características texturales y estructuras geológicas identificadas en el modelo conceptual. Este proceso permite representar la heterogeneidad del medio a una escala regional como un medio poroso equivalente, fortaleciendo la correspondencia entre el modelo conceptual y su implementación numérica (Anderson et al., 2015).

Como se mencionó en el capítulo 4.2.3 la geología del área de la zona insular de San Andrés ha sido presentada principalmente por Vargas (2004), con una interpretación similar a la realizada por Ingeominas (1992). Debido a las características tridimensionales del sistema, se realizó una extensión en profundidad de las unidades estratigráficas, considerando el modelo estructural y su representación espacial. Esto permitió construir un modelo geológico 3D, dividido sus formaciones (unidades geológicas) en zonas Norte y Sur a partir de la traza de la falla de San Andrés. La parametrización hidrogeológica permite la identificación en 3D de las unidades geológicas, lo cual permite definir ocho zonas de conductividad hidráulica que fueron incorporadas al modelo numérico como se presenta en la Figura 5-7.

Figura 5-7. Parametrización unidades geológicas



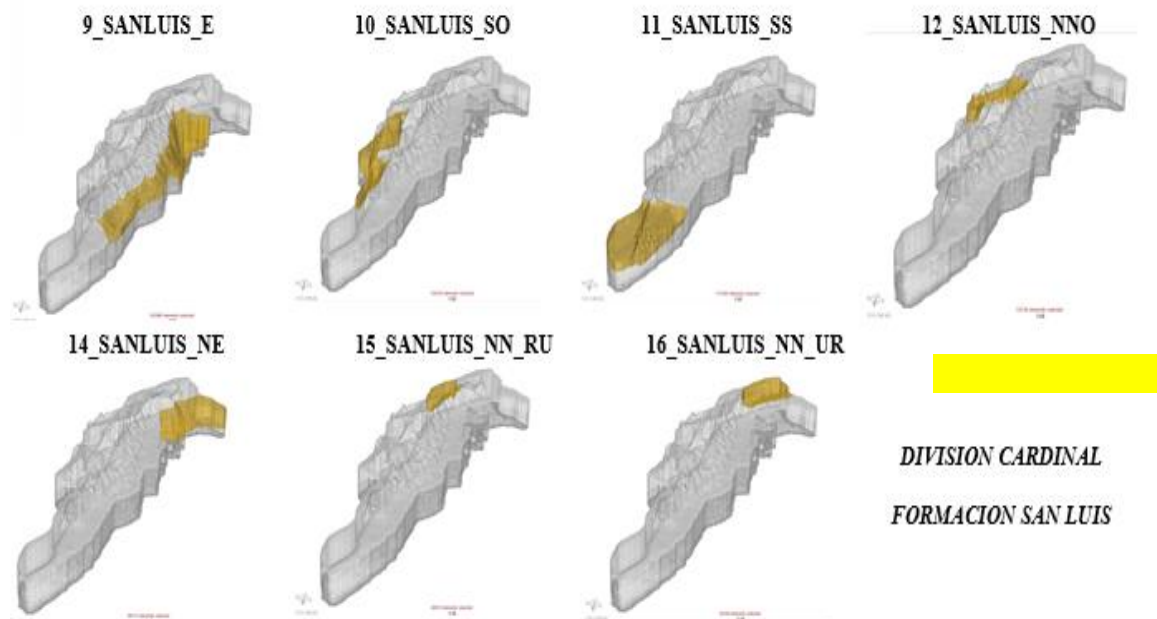
Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, en función de los diferentes procesos hidráulicos identificados (capítulo 4.4) y del número de pozos registrados en el área (capítulo 4.4.3), los cuales concentran la mayor cantidad de accesos al recurso hídrico ubicado sobre la Formación San Luis, se definió una parametrización específica para esta unidad geológica. Dicha parametrización se realizó teniendo en cuenta su ubicación cardinal, como se muestra a en la Figura 5-8.

La implementación de esta parametrización en el MHN permite delimitar zonas con propiedades hidráulicas homogéneas, facilitando la asignación de parámetros representativos para cada unidad o sector. Esta zonificación constituye la base para los procesos de calibración del modelo, los cuales se detallan en el siguiente capítulo. La coherencia entre la distribución espacial de las propiedades hidráulicas y la respuesta simulada del sistema hidrogeológico.

No obstante, es importante reconocer que esta aproximación conlleva ciertas limitaciones inherentes a la simplificación del medio geológico, como la heterogeneidad a pequeña escala no representada y la incertidumbre en los valores de conductividad hidráulica asignados.

Figura 5-8. Parametrización formación San Luis



Fuente: Elaboración propia

5.4. Calibración

La calibración consiste en ajustar los parámetros hidráulicos del modelo, con el objetivo de que los niveles piezométricos, así como las concentraciones de salinidad simulados reproduzcan de manera aceptable los niveles y concentraciones observados (medidos) en campo. Este proceso se basa en los puntos de observación disponibles, donde se cuenta con información de niveles de agua subterránea y, en algunos casos, conductividad eléctrica, lo cual permite validar y ajustar la respuesta del modelo numérico con el conocimiento del sistema hidrogeológico.

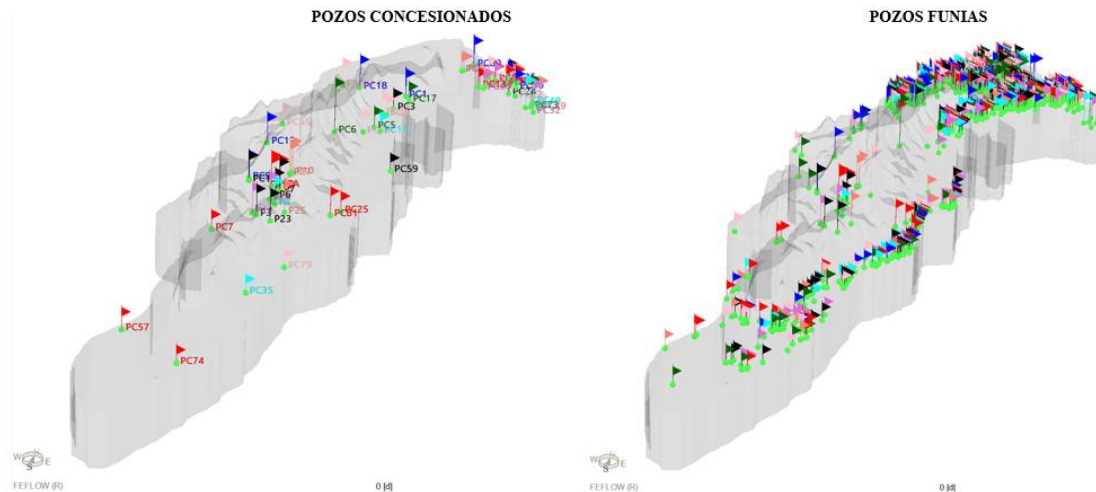
5.4.1. Puntos de observación

En el modelo se definieron puntos de observación con base en la disponibilidad de datos de campo, priorizando aquellos con registros de niveles piezométricos y conductividad eléctrica. Estos puntos fueron seleccionados para la calibración tanto de las cargas hidráulicas como de la salinidad, permitiendo evaluar simultáneamente el comportamiento del flujo y la distribución de la calidad del agua subterránea.

Al igual que en el modelo conceptual (ver capítulo 4.4.1.1), se seleccionaron los meses de diciembre de 2017 y enero de 2018 como periodo de calibración. Esta elección se fundamenta en la alta disponibilidad de datos coincidentes con el inventario de FUNIAS durante ese intervalo de tiempo, así como en el hecho de que corresponde a la época más seca del año.

En ese sentido, se seleccionaron 57 puntos de observación correspondientes a pozos concesionados que cuentan con mediciones dentro del intervalo de tiempo definido. Adicionalmente, se incorporaron 1574 como puntos de observación los pozos del inventario FUNIAS que registran mediciones de nivel y concentración para el mismo periodo como se muestra en la Figura 5-9. Los cuales pueden ser consultados fácilmente dentro del modelo numérico.

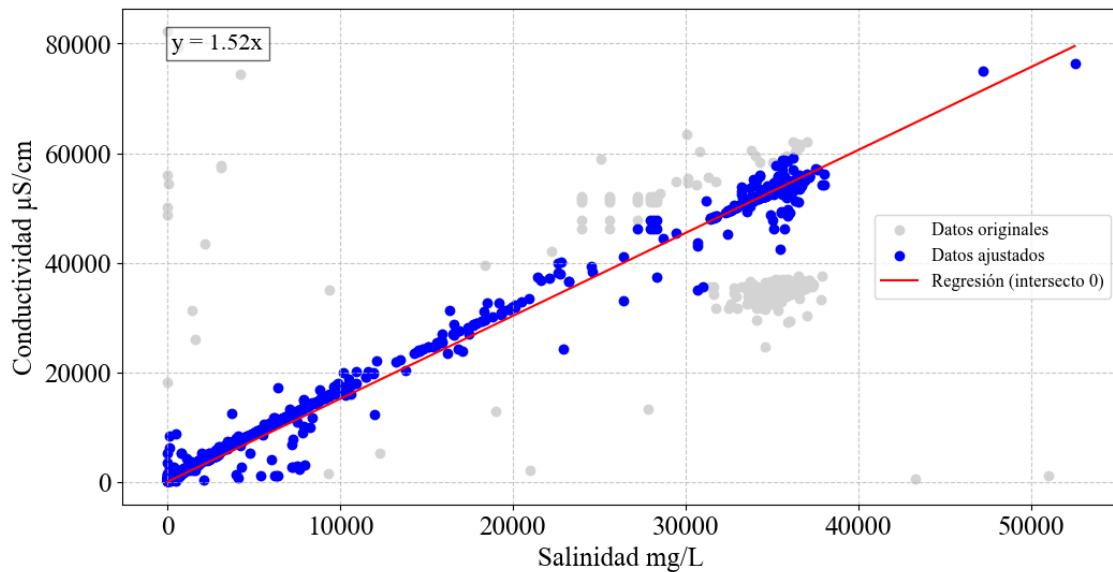
Figura 5-9. Pozos de observación – modelo hidrogeológico numérico



Fuente: Elaboración propia

Finalmente, es importante destacar que el modelo numérico simula la concentración de un soluto, mientras que la conductividad eléctrica ha sido un parámetro medido directamente en campo. Sin embargo, se dispone de información en la que la salinidad y la conductividad eléctrica fueron registradas de manera simultánea, lo que permite establecer una relación empírica entre ambos parámetros. Esta correlación resulta especialmente útil, ya que permite aprovechar la extensa base de datos de conductividad eléctrica disponible para ajustar e interpretar los resultados del modelo de transporte. A partir de los datos representados en la Figura 5-10 se obtuvo una regresión lineal que describe esta relación, la cual se expresa mediante la siguiente ecuación: : Conductividad Eléctrica (uS/cm)= 1.52 Salinidad (mg/L).

Figura 5-10. Relación salinidad conductividad eléctrica San Andrés



Fuente: Elaboración propia

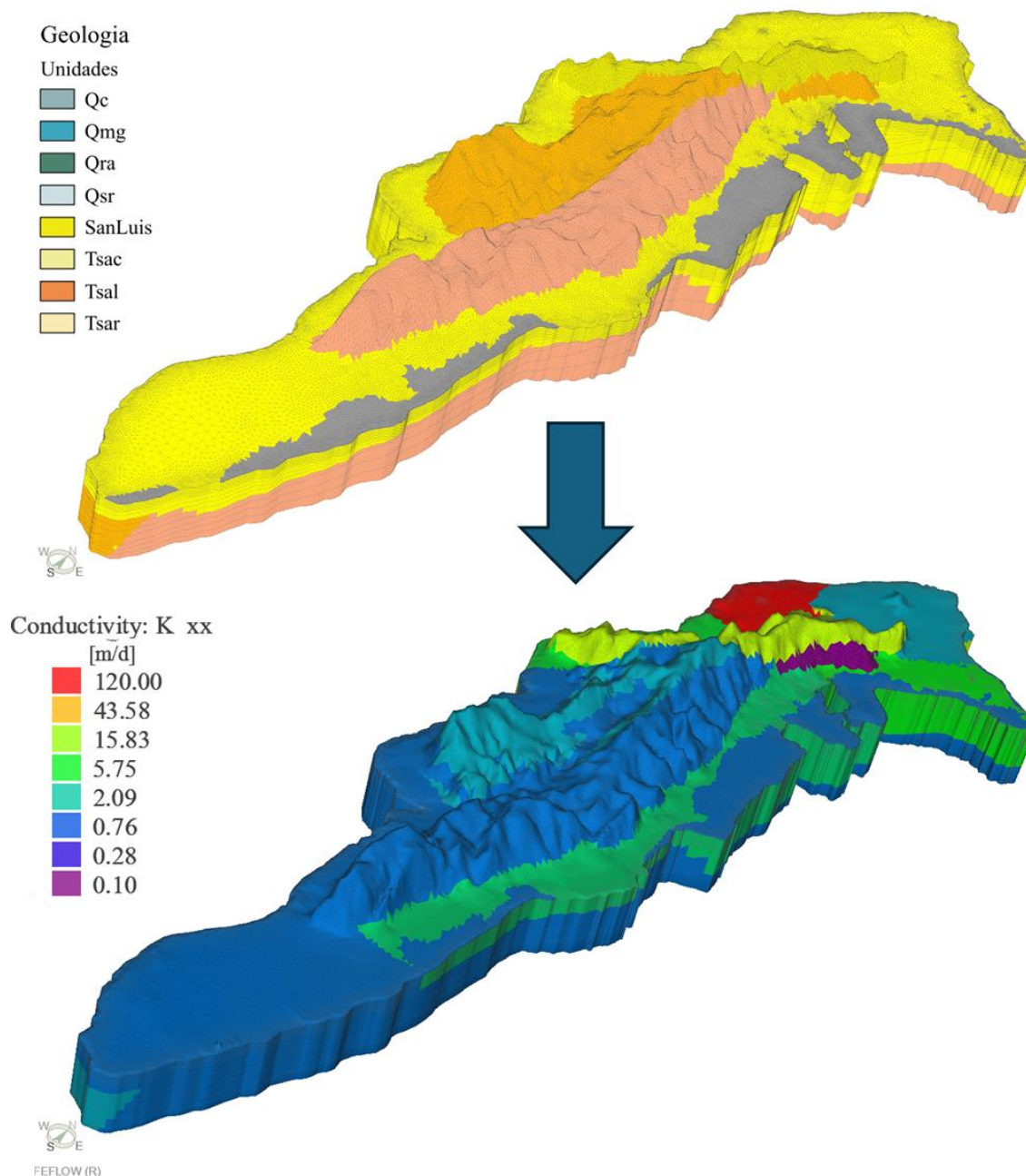
Esta expresión permite vincular directamente los resultados del modelo con las mediciones de campo, facilitando la validación y comparación de ambos conjuntos de información.

5.4.2. Calibración estacionaria

La calibración del modelo consiste en ajustar los parámetros hidráulicos, principalmente la conductividad hidráulica y los parámetros de transporte dispersividad y difusión molecular, de manera que los niveles piezométricos simulados y las concentraciones de salinidad (estimadas anteriormente) simuladas reproduzcan con la mayor aproximación posible los niveles observados en campo.

Como se describió anteriormente, a partir de las 5 unidades geológicas se generaron 13 zonas de parámetros, como se presenta en la Figura 5-11, esto con el objetivo de obtener los parámetros durante la calibración en estado estacionario.

Figura 5-11. Zonas de parámetros modelo hidrogeológico numérico

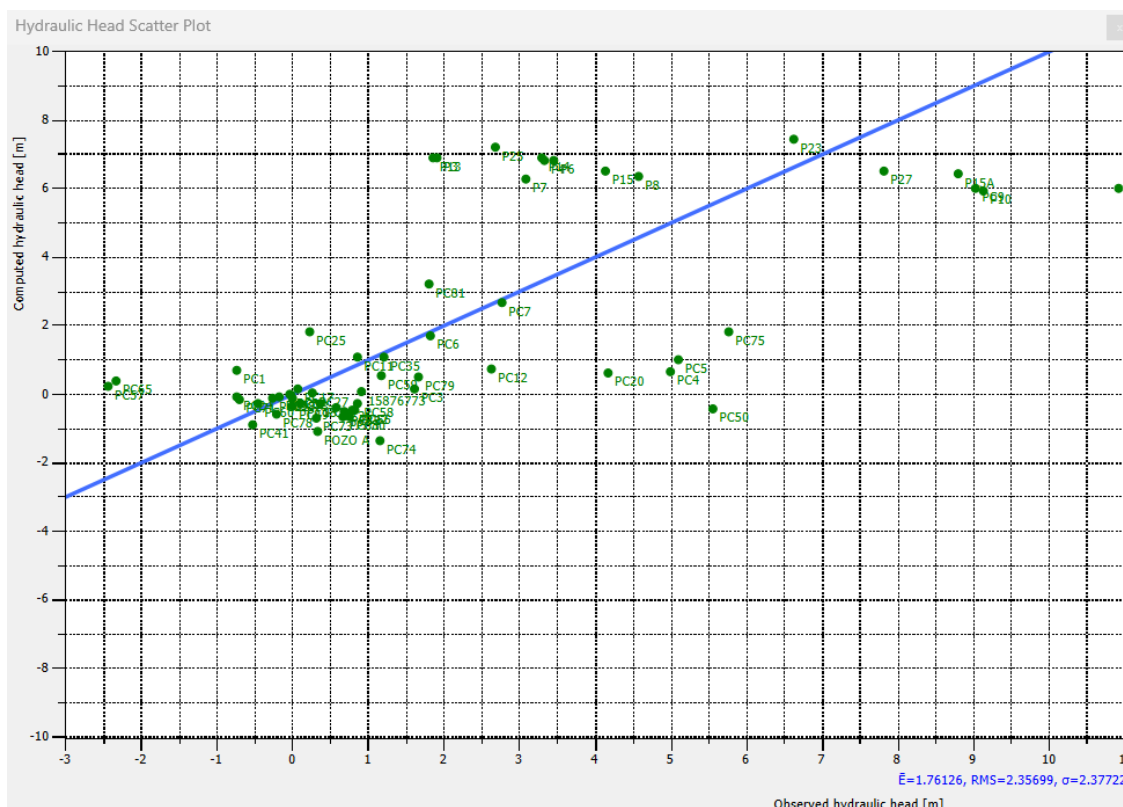


Fuente: Elaboración propia

La calibración del modelo en estado estacionario se llevó a cabo mediante un enfoque iterativo de prueba y error. Para el flujo el ajuste de los niveles piezométricos o carga hidráulica obtenido presenta un error cuadrático medio (RMSE) de 2.3 m y un error medio absoluto (MAE) de 1.72 m, lo cual indica una correspondencia razonable entre los niveles piezométricos simulados y medidos.

La Figura 5-12 muestra la comparación gráfica entre ambos conjuntos de datos, junto con la línea de identidad ($y = x$), que representa el ajuste perfecto. Aunque los resultados reflejan una calibración aceptable, es importante reconocer la presencia de incertidumbres inherentes al proceso, como posibles errores en las mediciones de campo, la precisión del modelo digital de elevación (DEM), la caracterización de las propiedades hidráulicas del subsuelo y las simplificaciones adoptadas en la conceptualización hidrogeológica.

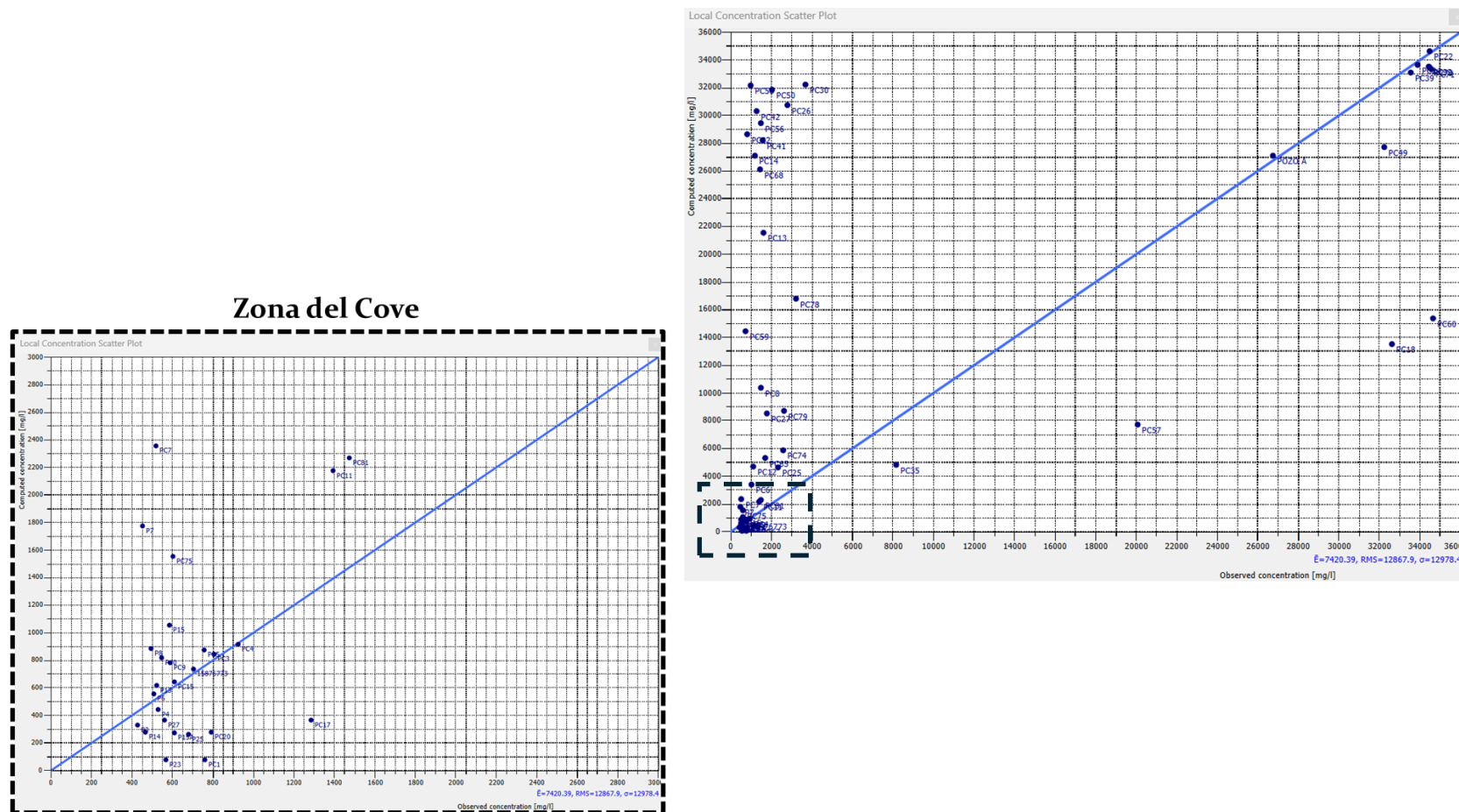
Figura 5-12. Carga Hidráulica Simulada vs Observada – Calibración estacionaria



Fuente: Elaboración propia

Para el transporte el ajuste de las concentraciones de salinidad obtenido presenta un error cuadrático medio (RMSE) de 1280 mg/L y un error medio absoluto (MAE) de 7400 mg/L, tal y como se observa en la Figura 5-14, lo cual indica una correspondencia razonable entre los niveles piezométricos simulados y medidos. Sin embargo, se observa que para la zona de la planta desalinizadora el ajuste es muy bueno (Pozo A) y en la zona del Cove también se observa un buen ajuste. Esto indica que la geometría de la cuña de intrusión está bien representada y su análisis se realizará en la siguiente sección.

Figura 5-13. Concentración Salinida Simulada vs Observada – Calibración estacionaria



Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 5-1 se presentan los parámetros de flujo, transporte y la recarga obtenidos en la calibración estacionaria, los cuales guardan estrecha coherencia con los valores presentados en el modelo hidrogeológico conceptual.

Tabla 5-1. Parámetros Ajustados – Calibración Estacionaria

Unidad	Zona	K (m/d)	Recarga	Dispersividad (m)		
				Transversal	Longitudinal	
Cuaternario	Q	Q	1	350	5	20
San Luis	Tsl	Tsl E	3	680	8	20
		Tsl SO	1	680	8	20
		Tsl SS	1	680	8	20
		Tsl NNO	5	800	8	20
		Tsl NE	6	80	8	20
		Tsl NN_RU	120	800	8	20
		Tsl NN_UR	1.5	800	8	20
	Tsar	Fm Tsar	1	700	5	20
San Andrés	Tsal	Tsal	1.5	700	5	20
		Tsal N	0.1	700	5	20
	Tsac	Tsac	1	-	5	20
		Tsac N	20	700	5	20

Fuente: Elaboración propia

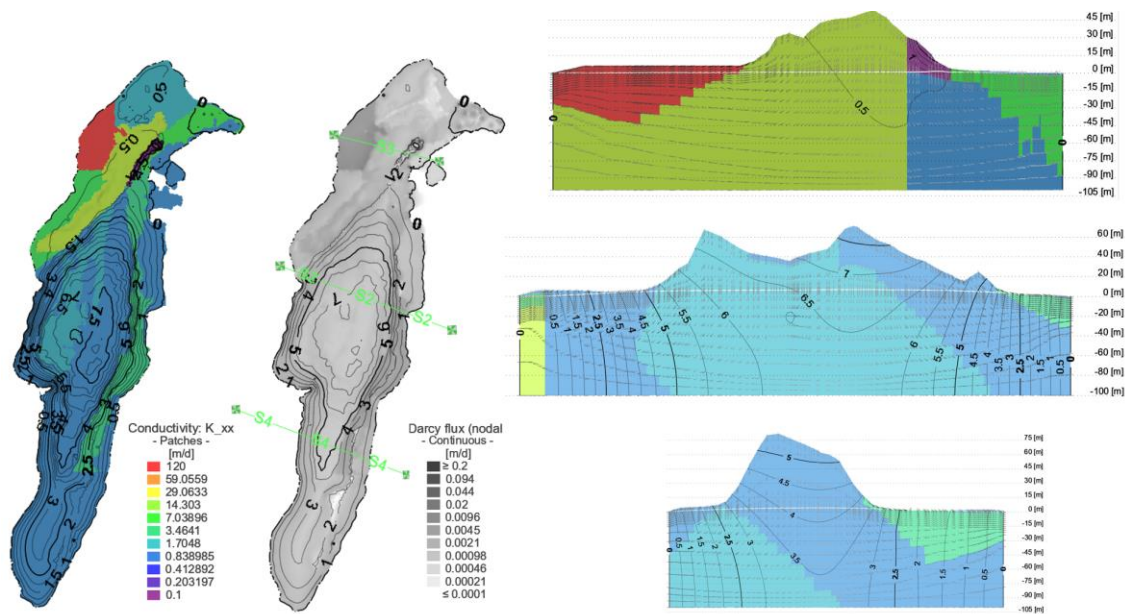
5.5.Resultados

Respecto al flujo del agua subterránea, los resultados indican que este se da predominantemente desde el centro de la isla hacia las periferias, con cargas hidráulicas que oscilan entre 8 y 0 msnm. En la Figura 5-14 se presenta la distribución espacial de las cargas y las velocidades de Darcy calculadas.

En los perfiles, dichas velocidades se representan mediante flechas ("bullets") que indican la dirección del flujo. Se observa una relación directa entre la conductividad hidráulica y las velocidades simuladas, registrándose los valores más altos en el costado suroccidental de la isla, donde se alcanzan velocidades de hasta 0.8 m/d, con un promedio general de 0.009 m/d en todo el dominio modelado.

Estas velocidades reflejan un flujo generalmente lento en la mayor parte del sistema hidrogeológico, característico de medios de baja a moderada permeabilidad, mientras que los valores más altos en el sector suroccidental indican la presencia de zonas de alta permeabilidad o flujo preferencial, con potencial incidencia en la vulnerabilidad a la intrusión salina.

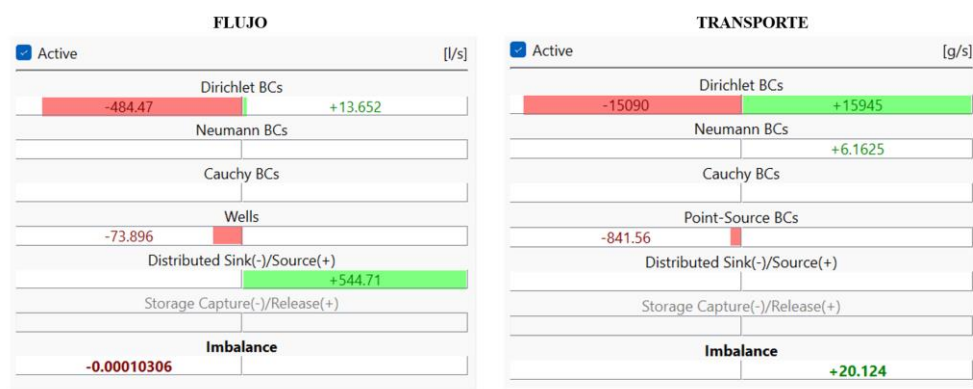
Figura 5-14. Resultados Carga hidráulica – velocidad Darcy



Fuente: Elaboración propia

En cuanto al balance de flujo del modelo, en la Figura 5-15 se observa que las principales salidas del sistema están asociadas a las condiciones de borde tipo Dirichlet (entrada y salida del mar), con un valor total de -484.47 L/s , mientras que las entradas por este mismo tipo de condición ascienden a $+13.65 \text{ L/s}$. Las fuentes distribuidas, que corresponden probablemente a procesos de recarga por precipitación o infiltración, aportan $+544.71 \text{ L/s}$ al sistema, compensando en gran parte las pérdidas. La extracción de agua subterránea a través de pozos representa una salida adicional de -73.90 L/s . El balance general del modelo de flujo presenta un desequilibrio de apenas -0.0001 L/s , lo cual indica una excelente conservación de masa y una solución numérica estable y confiable.

Figura 5-15. Resultados balance flujo y transporte



Fuente: Elaboración propia

Finalmente se presentan los resultados del modelo en términos de carga hidráulica y concentración de salinidad, para la facilidad de mostrar resultados se tomó como referencia los valores de tabla la clasificación del agua según su salinidad en ppm (equivalente a mg/L), basada en los rangos definidos por el USGS: agua dulce (<1.000 ppm), ligeramente salina (1.000–3.000 ppm), moderadamente salina (3.000–10.000 ppm), y altamente salina (10.000–35.000 ppm), siendo el agua de mar típicamente de ~35.000 ppm (USGS, s.f.).

Tabla 5-2. Parámetros para clasificar tipo de agua según salinidad según USGS

Tipo de agua	Salinidad (ppm o mg/L)
Agua dulce	< 1,000
Agua ligeramente salina	1,000a 3,000
Agua moderadamente salina	3,000 a 10,000
Agua altamente salina	10,000 a 35,000
Agua de mar (referencia)	~35,000

Fuente: (USGS, s.f.).

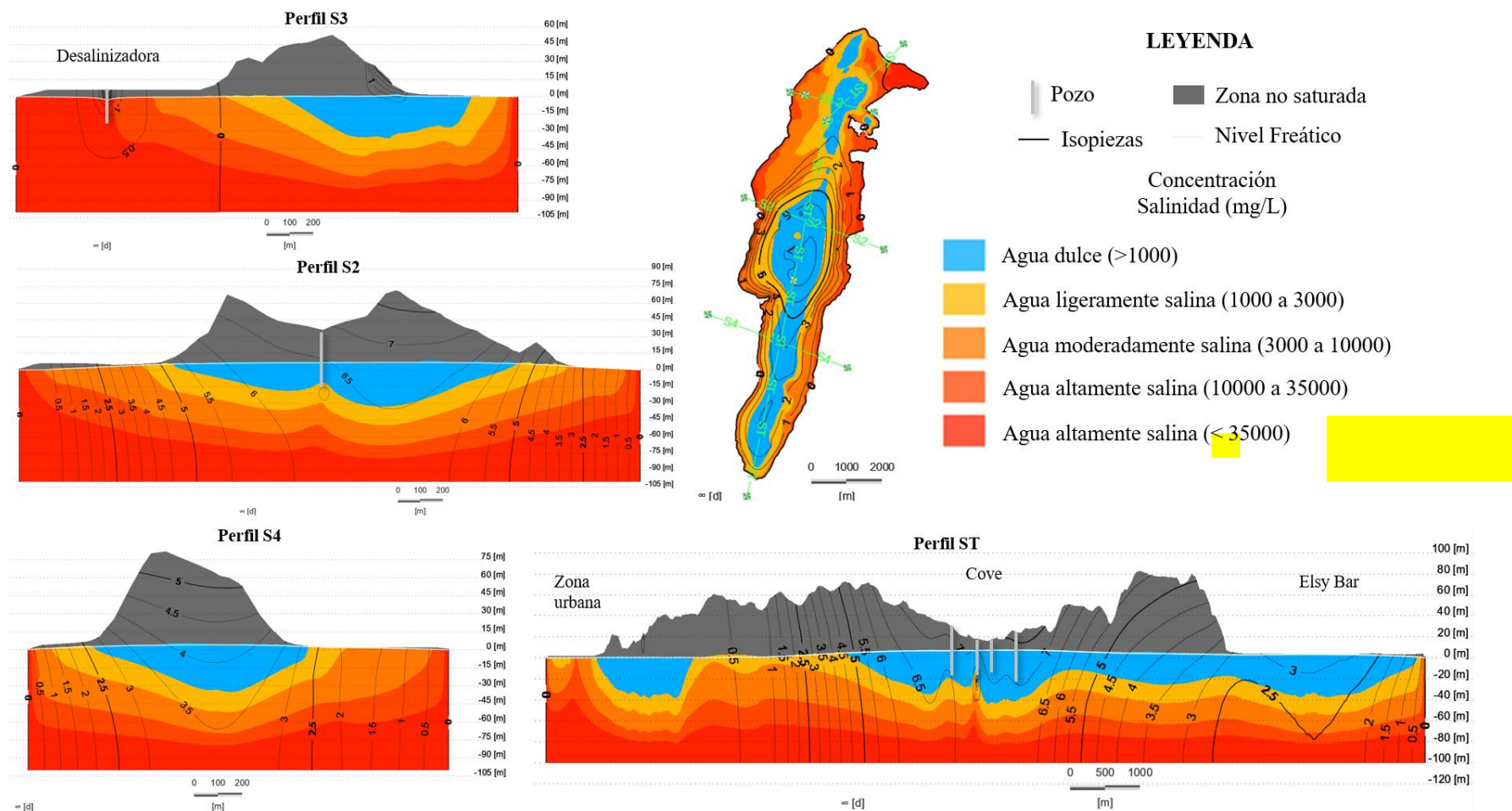
En ese sentido en la Figura 5-16 se presentan 4 perfiles (3 perpendiculares y uno transversal a la isla) donde se observa lo siguiente de norte a sur:

- **Perfil S3:** ubicado sobre la planta desalinizadora en dirección hacia Hanes Bright, se identifica una zona de agua dulce con una cota mínima estimada de -40 msnm, la cual presenta una extensión lateral de aproximadamente 600 metros, principalmente hacia el este de la isla. Se presentan cargas hidráulicas entre -4 a 2 m mostrando un bajo gradiente hidráulico. En la desalinizadora, el bombeo se caracteriza por caudales elevados, y las rocas presentan una alta conductividad hidráulica. Si bien el efecto del bombeo de la desalinizadora es notorio como una intrusión lateral y como un ligero cono de abatimiento, esto podría ser un efecto aceptable por la ubicación de la zona de agua dulce.
- **Perfil S2:** ubicado sobre la cuenca de Cove se identifica una zona de agua dulce con una cota mínima estimada de -32 msnm, la cual presenta una extensión lateral de aproximadamente 1500 metros. Se presentan cargas hidráulicas entre -0 a 7 m mostrando un gradiente hidráulico considerable. El efecto de bombeos sobre el área de cove alteran levemente la geometría de la zona de intrusión vertical donde con bombeos actuales en esta zona se obtiene agua ligeramente salina.
- **Perfil S4:** ubicado sobre Sound Bay Road, se identifica una zona de agua dulce con una cota mínima estimada de -40 msnm y una extensión lateral aproximada de 1.000 metros. Se registran cargas hidráulicas entre 0 y 5 metros, lo que indica un gradiente hidráulico considerable. En esta zona no se evidencian efectos de bombeo, y la intervención humana es mínima, por lo que no se simulan indicios claros de intrusión salina, ni lateral ni vertical. Destaca la influencia de la recarga natural, visible como una entrada vertical en el centro del perfil.
- **Perfil ST:** este perfil representa un corte transversal que atraviesa la isla de norte a sur, pasando por las principales zonas de esta. A lo largo del perfil se evidencia la presencia e influencia de la zona de agua dulce, con variaciones en su distribución asociadas a condiciones locales. Los resultados indican que la zona

	FORTALECIMIENTO DE LA GESTION, EL CONOCIMIENTO Y LA GOBERNANZA DEL RECURSO HIDRICO DE LA RESERVA DE BIOSFERA SEAFLOWER, ARCHIPIELAGO DE SAN ANDRES, PROVIDENCIA Y SANTA CATALINA PULMON DEL CARIBE INSULAR	
--	---	--

urbana se encuentra fuertemente influenciada por su ubicación y por pequeños bombeos que modifican la dinámica del flujo subterráneo. Hacia el centro de la reserva y el sector occidental, las simulaciones muestran signos de intrusión salina, favorecida por altas conductividades hidráulicas, tanto en la Formación San Luis como en la Formación San Andrés (Tsac). Entre los sectores de The Cove y Elsybar, se conserva una zona continua de agua dulce, aunque ligeramente afectada por la extracción local.

Figura 5-16. Resultados MHN Carga hidráulica - Salinidad



Fuente: Elaboración propia

6. CONCLUSIONES

El sistema hidrogeológico de la isla está conformado por calizas detríticas de las formaciones San Luis y San Andrés, caracterizadas por una porosidad múltiple (primaria, fracturada y kárstica) y un comportamiento hidráulico altamente heterogéneo. Las zonas elevadas actúan como áreas de recarga activa, mientras que, en las zonas costeras, especialmente aquellas con menor elevación y vinculadas a la Formación San Luis, se evidencia la influencia de la intrusión marina.

La Formación San Andrés presenta una buena capacidad de transmisión ($K \approx 6 \text{ m/d}$), la extracción de agua en zonas urbanas modifica la posición de la zona de mezcla entre agua dulce y salobre. A pesar de estas dinámicas, el sistema muestra condiciones de equilibrio, con niveles y cargas hidráulicas relativamente estables frente a las tasas actuales de explotación.

Se desarrolló un modelo numérico de flujo y transporte a escala regional en estado estacionario correspondiente al mes de enero de 2018, con el objetivo de representar la intrusión salina en la isla bajo el escenario de bombeos actuales.

Los resultados para flujo el ajuste de los niveles piezométricos o carga hidráulica obtenido presenta un error cuadrático medio (RMSE) de 2.3 m y un error medio absoluto (MAE) de 1.72 m, con cargas hidráulicas que oscilan entre 8 y 0 msnm, y una dirección de flujo predominantemente desde el centro de la isla hacia las periferias.

En zona de la planta desalinizadora, presenta bombeo de caudales elevados en rocas de alta conductividad hidráulica, se observa el efecto del bombeo de la planta como una intrusión lateral y como un ligero cono de abatimiento, sin embargo, podría ser un efecto aceptable por la ubicación de la zona de agua dulce.

En la zona del Cove se observa que el efecto de bombeos sobre el área altera levemente la geometría de la zona de intrusión vertical donde con bombeos actuales en esta zona se obtiene agua ligeramente salina.

En la zona Urbana (norte de la Isla) la zona urbana se encuentra fuertemente influenciada por su ubicación y por pequeños bombeos que modifican la dinámica del flujo subterráneo.

El modelo permite estimar la amplitud y distribución espacial de la zona de agua dulce, así como identificar los sectores más vulnerables a la salinización, considerando la interacción entre la recarga, la geometría del acuífero y las condiciones de borde impuestas.

Se ha realizado un análisis detallado de la información de niveles freáticos a partir de una base de datos amplia suministrada por Coralina, lo cual representa un insumo de gran valor hidrogeológico, especialmente para evaluar el comportamiento del sistema en el

tiempo. No obstante, la escasa información disponible sobre la litología local asociada a los puntos de extracción y monitoreo, así como la falta de detalle en los diseños constructivos de los pozos, limita significativamente la interpretación integral de los datos y su vinculación con las características hidrogeológicas del medio. Esta situación resalta la necesidad de fortalecer la caracterización del subsuelo y los registros técnicos asociados a la infraestructura de captación.

Aunque en este informe no se aborda temas de calidad es importante reconocer que la intrusión salina se ha basado principalmente en los límites de referencia para consumo humano, particularmente en concentraciones de cloruros inferiores a 250 mg/L. Sin embargo, dado que el uso del agua subterránea es predominantemente doméstico, y considerando la proximidad al mar, es posible que ocurran procesos naturales como la evaporación o el ingreso de aguas ligeramente salinas con cloruros por encima de dicho umbral, que podrían estar aportando recarga al sistema acuífero. Esta posibilidad debe ser considerada y los límites en función del uso deben ser evaluados nuevamente en términos de calidad.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

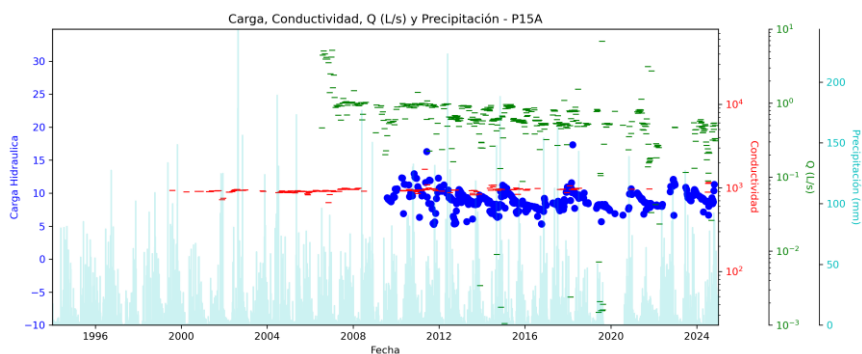
- Ángel M., Carlos E., (1993). Informe “Hidrogeología de la Isla de San Andrés”. Ingeominas.
- Anderson, M., Woessner, W., & Hunt, R. (2016). Applied Groundwater Modeling-Simulation of Flow and Advective Transport. In *Groundwater* (Vol. 54, Issue 6). <https://doi.org/10.1111/gwat.12464>
- Bailey, R. T., Jenson, J. W., & Olsen, A. E. (2009). Numerical modeling of Atoll Island hydrogeology. *Ground Water*, 47(2), 184–196. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2008.00520.x>
- Bedoya, M., Vélez, J. I., Vélez, M. V., Poveda, G., & Carmona, J. (2010). Modelo Numérico del Acuífero de la Isla de San Andrés, Colombia.
- IDEAM. (2017). *Atlas Climatológico de Colombia*. Bogotá D.C., Colombia. doi:ISSN: 978-958-8067-95-7
- Diersch, H.-J. G. (2014). FEFLOW. In *FEFLOW*. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-38739-5>
- Geister, J., & Díaz, J. M. (2007). *Ambientes Arrecifales y Geología De Un Archipiélago Océánico: San Andrés, Providencia Y Santa Catalina (Mar Caribe, Colombia) con Guía Campo*. www.ingeominas.gov.co
- Ingeominas (1993) Estudio del Acuífero de San Andrés y Recuperación del Campo de Pozos. Informe “Hidrogeología de la Isla de San Andrés
- Huguett, A. (1989). Compilación hidrogeológica de las Islas de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. Subdivisión de Geología aplicada, división de hidrogeología, INGEOMINAS. Bogotá.
- Ramírez, L., & Vargas, T. (2018). Evaluación de la Vulnerabilidad a la Contaminación por Cuña Marina en los Acuíferos de San Andrés (Colombia) Bajo Escenarios de Cambio Climático. Bogotá D.C.
- Vargas-Cuervo, G. (2004). Geología y Aspectos Geográficos de la Isla de San Andrés, Colombia. Geología Colombiana.
- Oviedo Prada, Karen Cristina, 2019. Análisis de las anomalías de magnetismo del subsuelo marino en la zona comprendida entre el sur de la isla de San Andrés y el norte de la isla Cayos De Albuquerque, Colombia. Maestría en Ciencias de la Tierra (tesis). Universidad EAFIT.
- Trefry, M. G., & Muffels, C. (2007). FEFLOW: A finite-element ground water flow and transport modeling tool. *Ground Water*, 45(5), 525–528. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2007.00358.x>
- U.S. Geological Survey (USGS). s.f. *Saline Water and Salinity*. Disponible en: <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/saline-water-and-salinity> (consultado el 6 de marzo de 2025).

	FORTALECIMIENTO DE LA GESTION, EL CONOCIMIENTO Y LA GOBERNANZA DEL RECURSO HIDRICO DE LA RESERVA DE BIOSFERA SEAFLOWER, ARCHIPIELAGO DE SAN ANDRES, PROVIDENCIA Y SANTA CATALINA PULMON DEL CARIBE INSULAR	
--	---	--

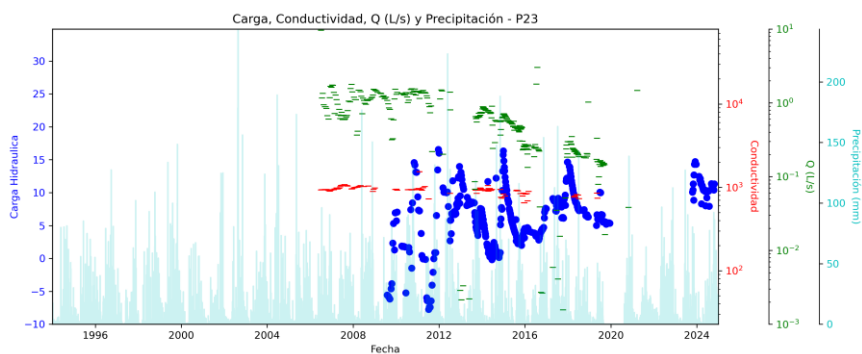
Unal (2010) Modelación del acuífero San Andrés Islas bajo escenarios de Cambio Climático y Usos del recurso, Proyecto INAP-Colombia, Universidad Nacional de Colombia – Facultad de Minas, Medellín, Colombia.

8. ANEXOS

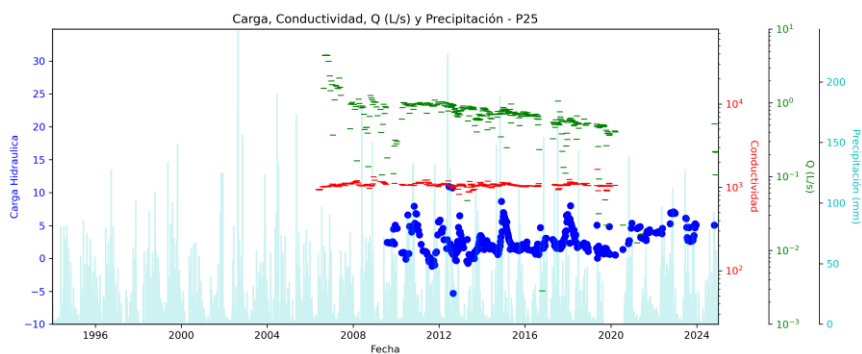
8.1. Anexo 1 – Hidrogramas



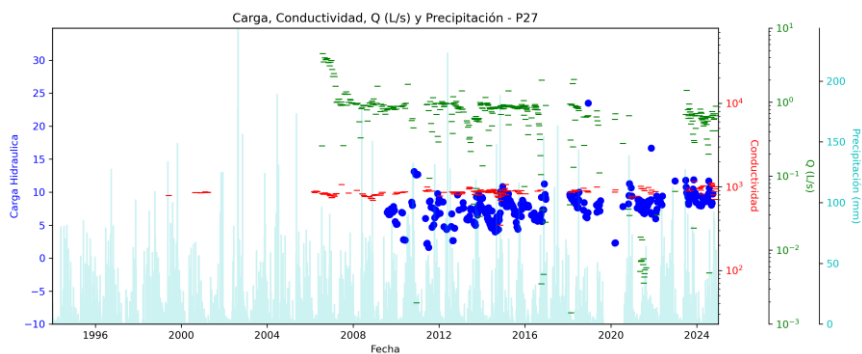
P15A



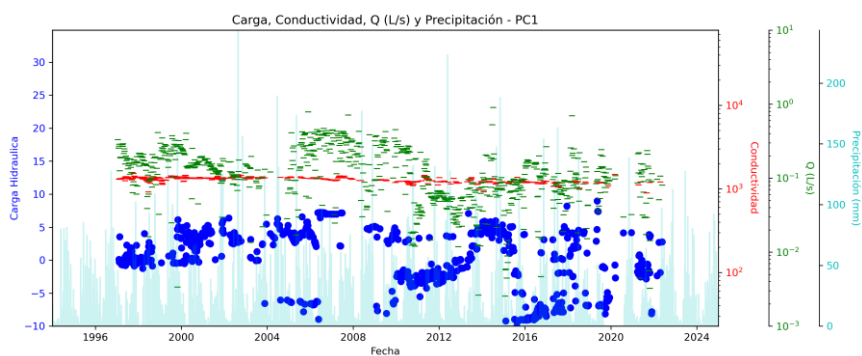
P23



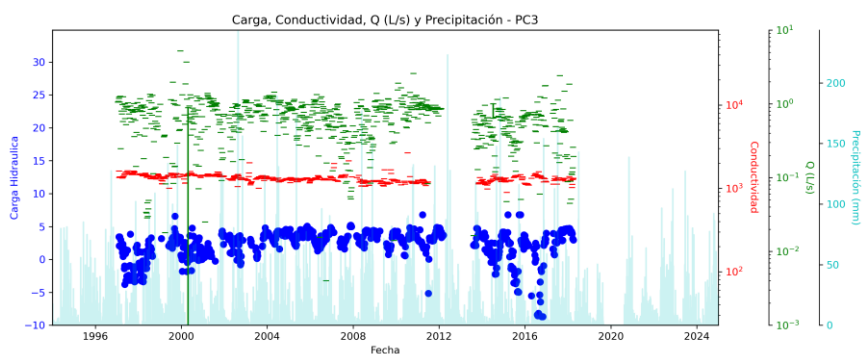
P25



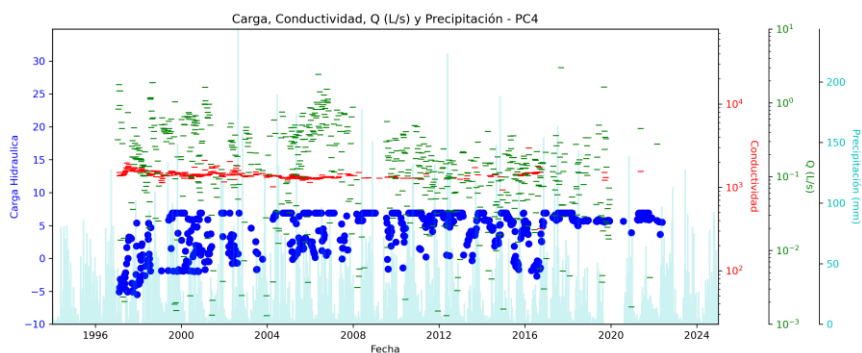
P27



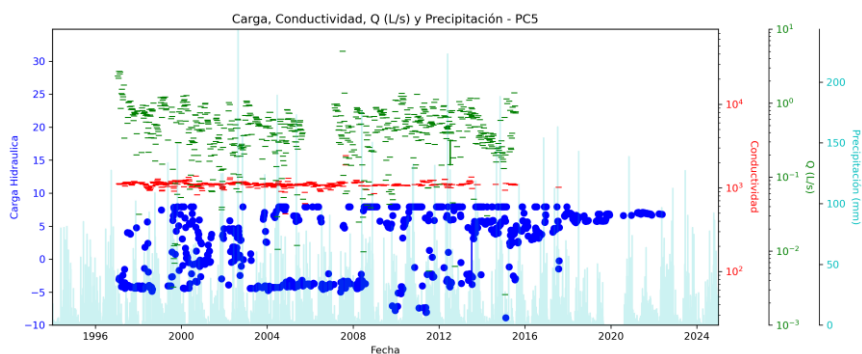
PC1



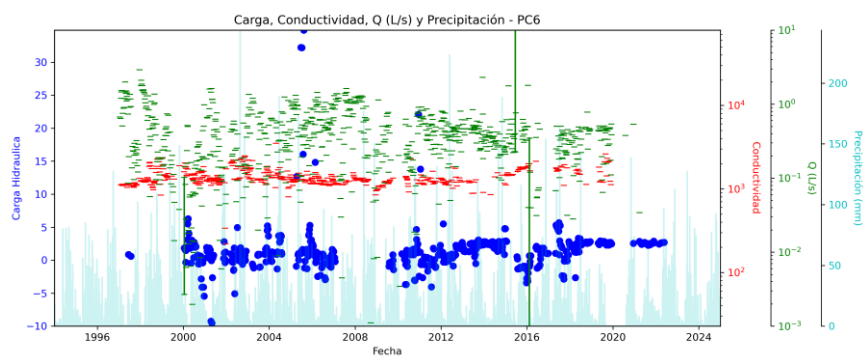
PC3



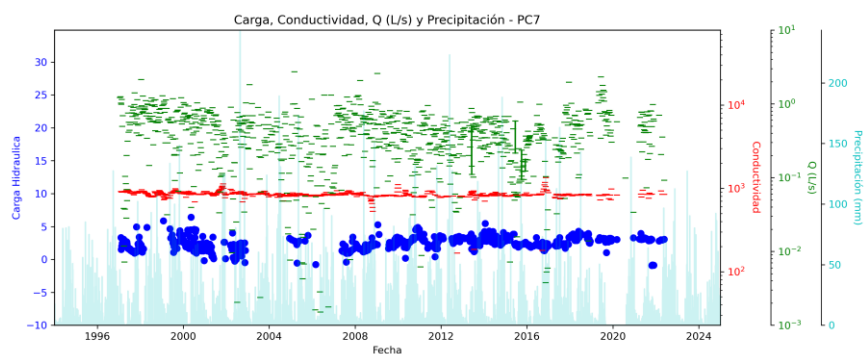
PC4



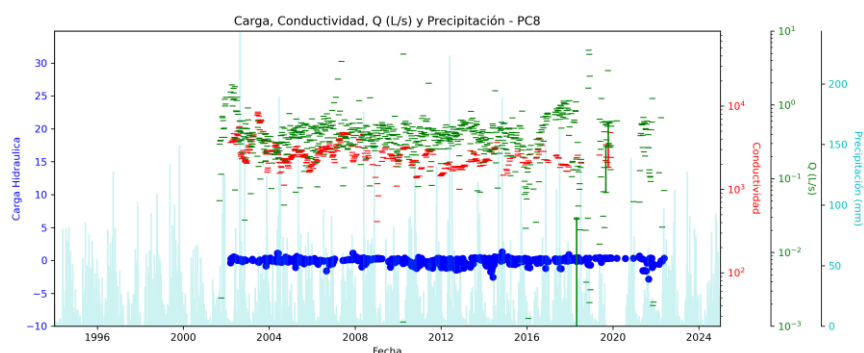
PC5



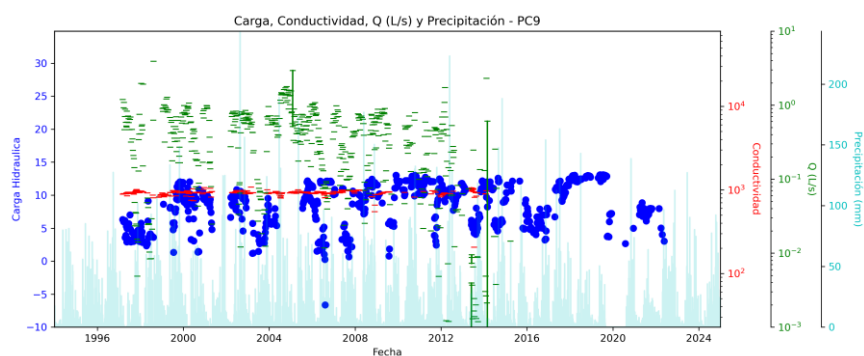
PC6



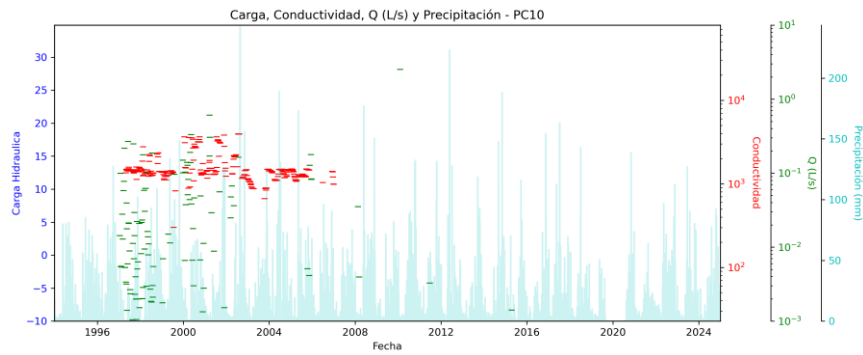
PC7



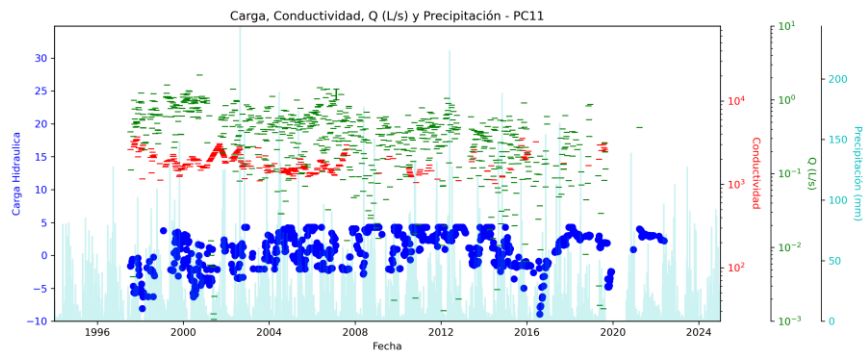
PC8



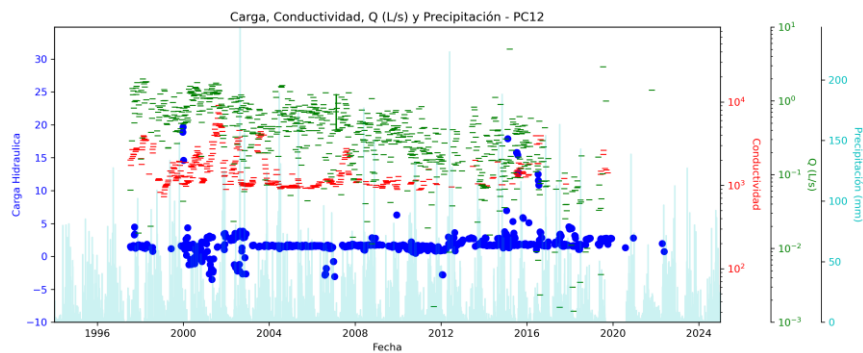
PC9



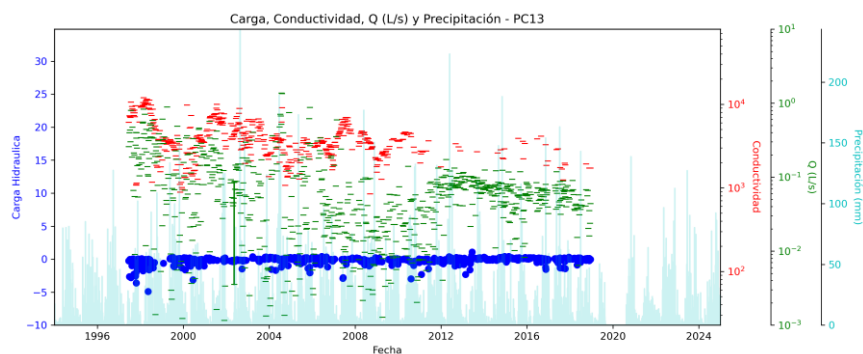
PC10



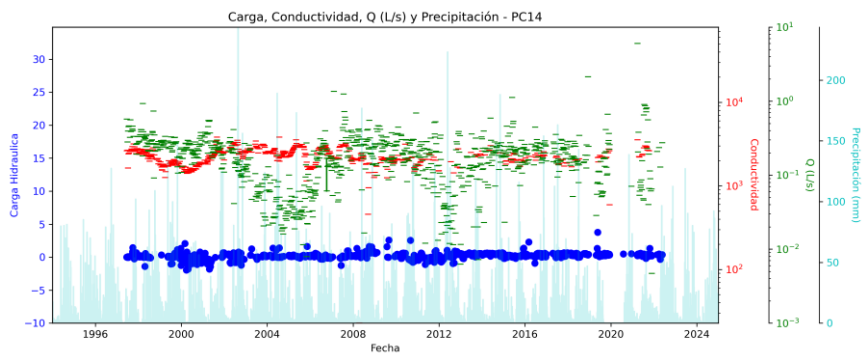
PC11



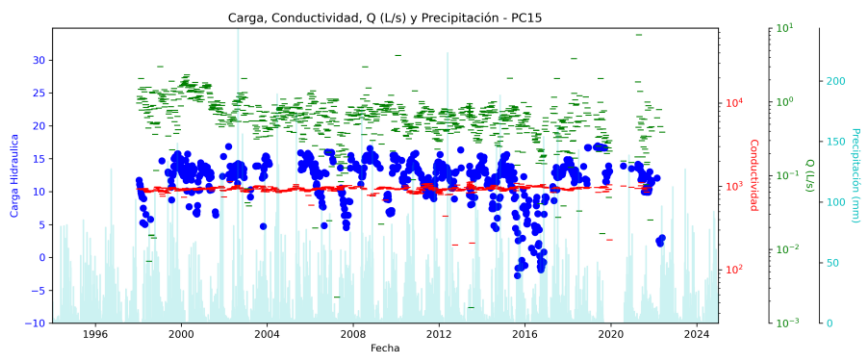
PC12



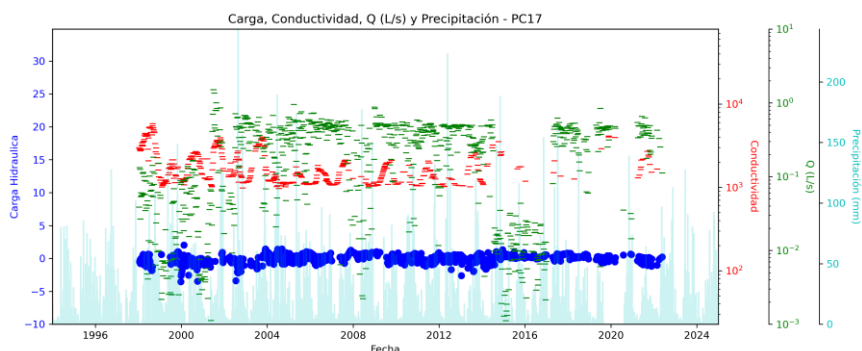
PC13



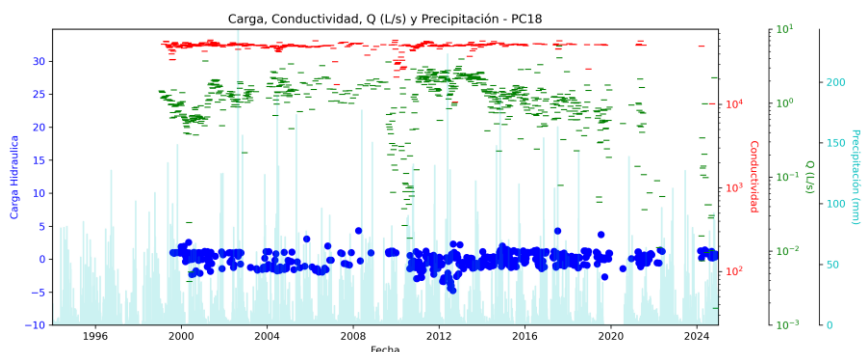
PC14



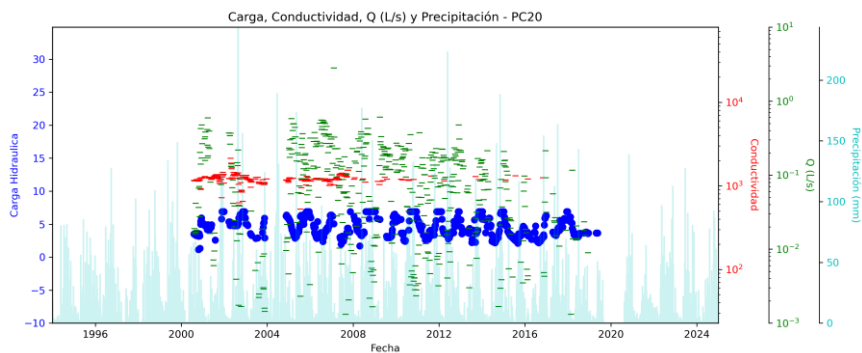
PC15



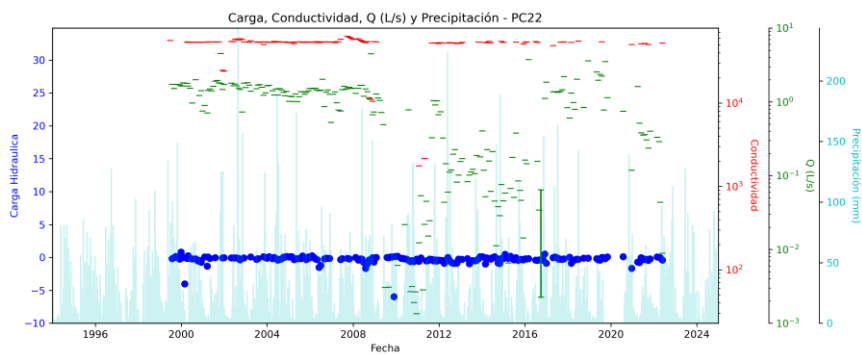
PC17



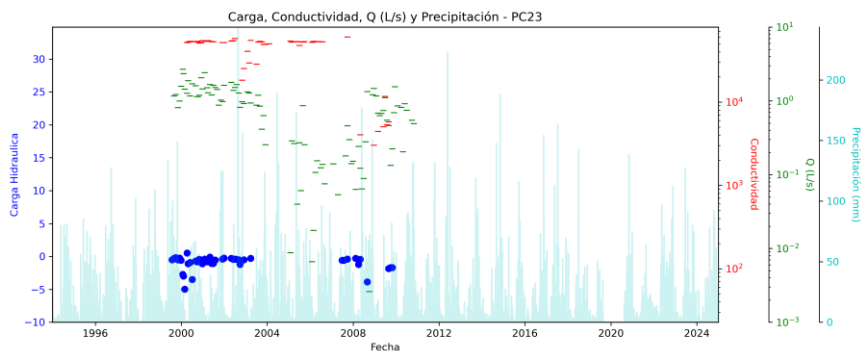
PC18



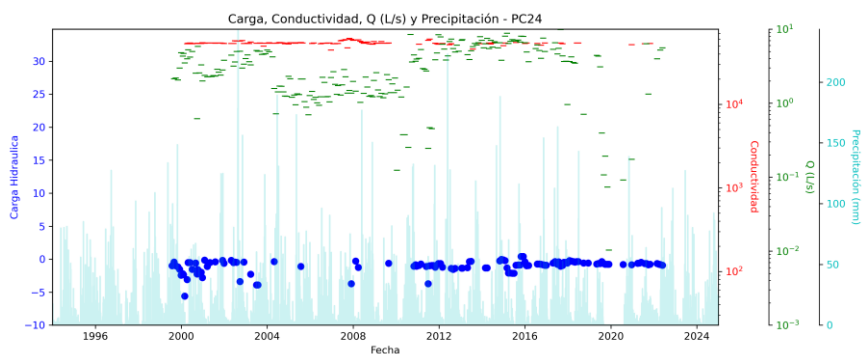
PC20



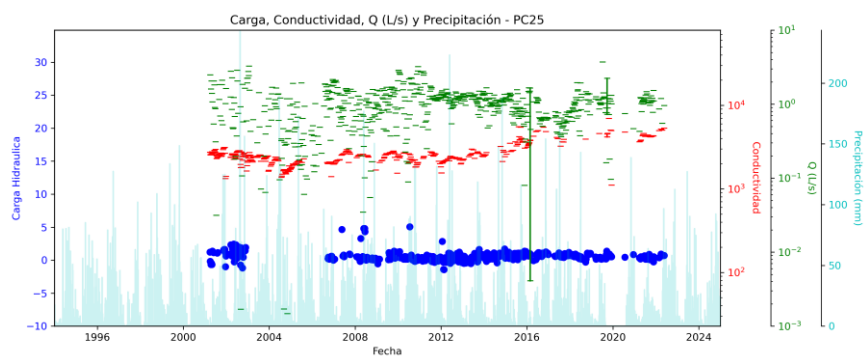
PC22



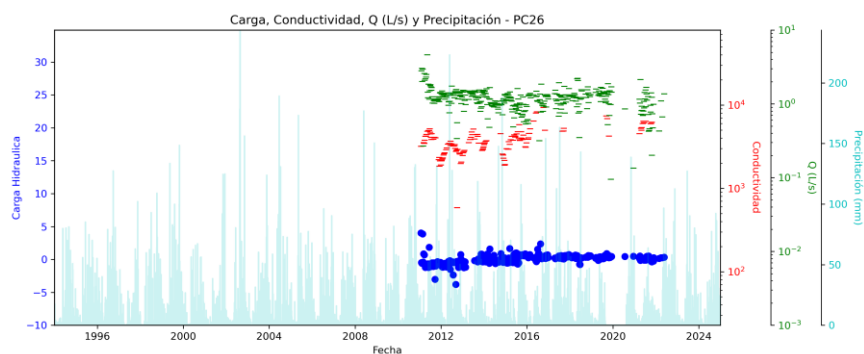
PC23



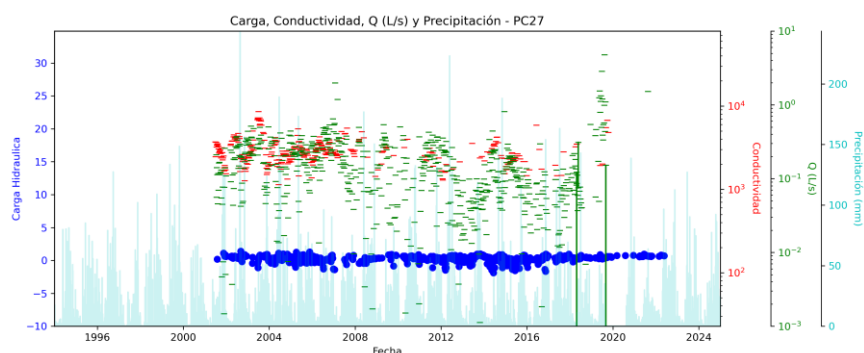
PC24



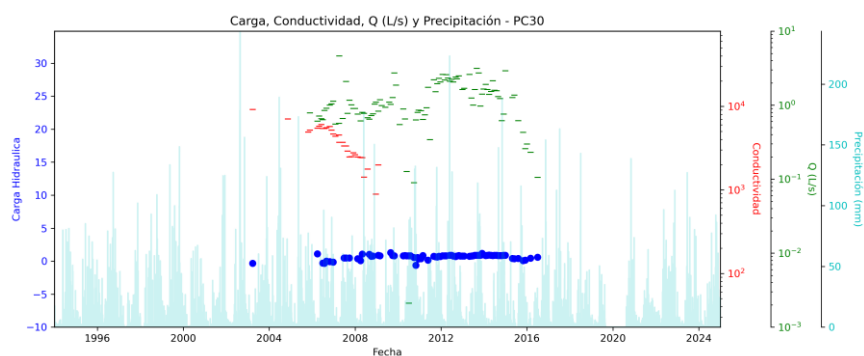
PC25



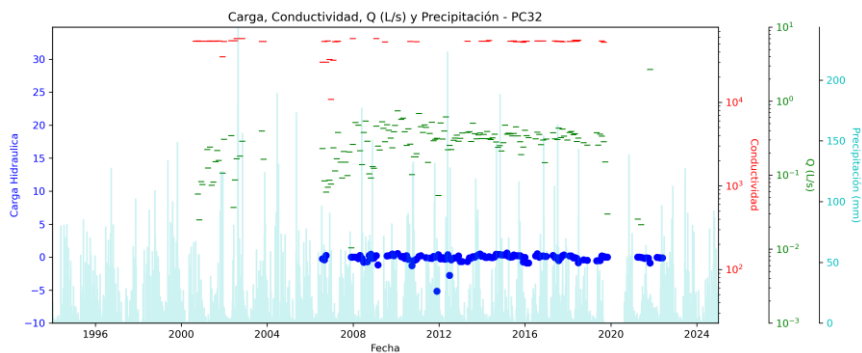
PC26



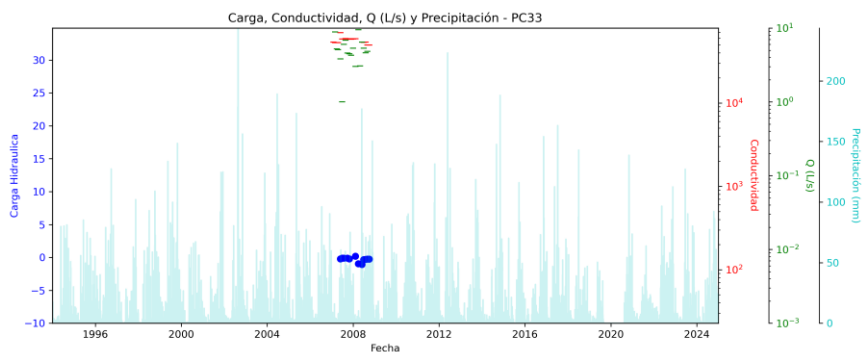
PC27



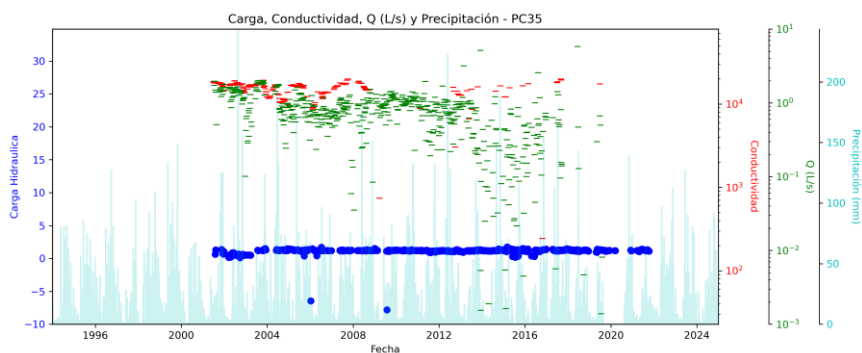
PC30



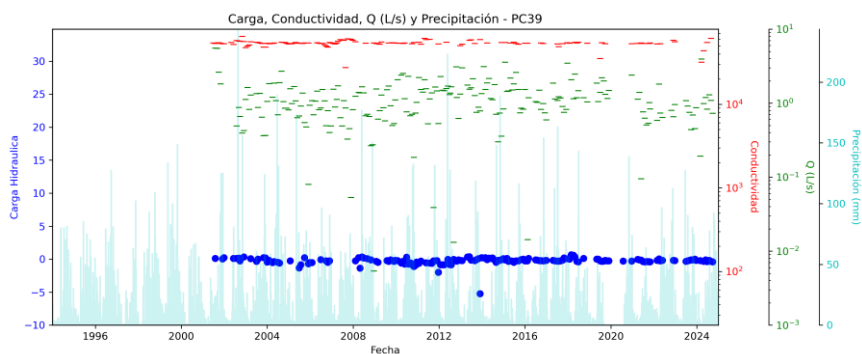
PC32



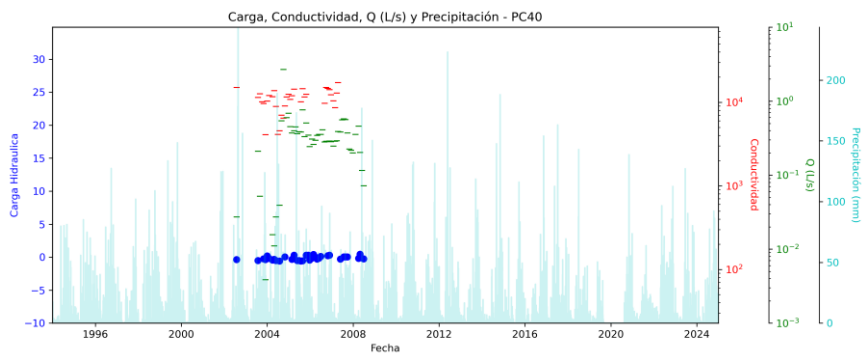
PC33



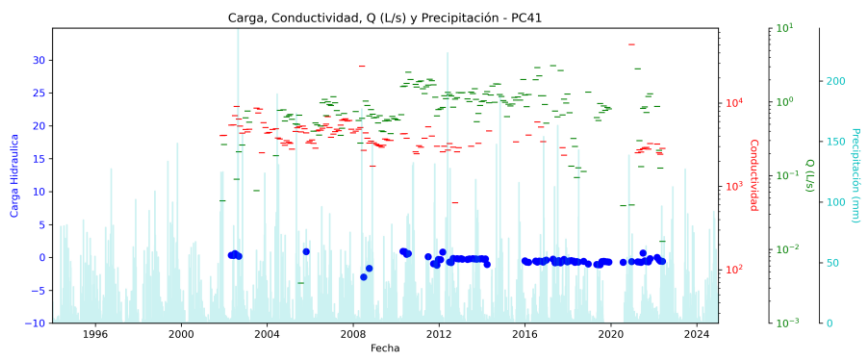
PC35



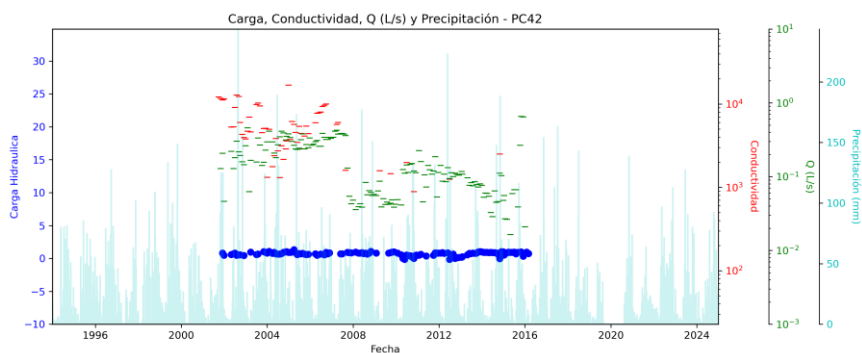
PC39



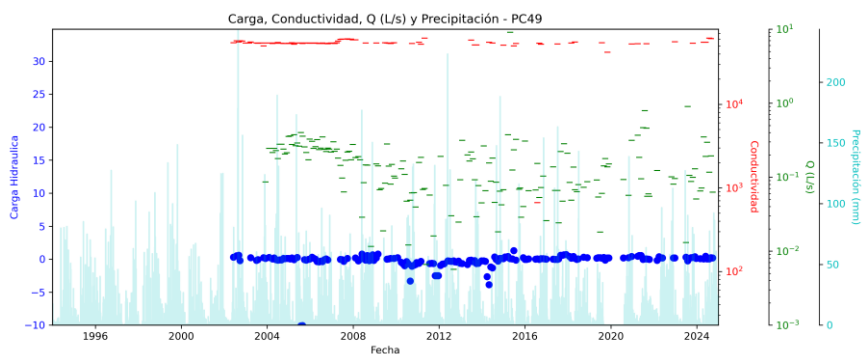
PC40



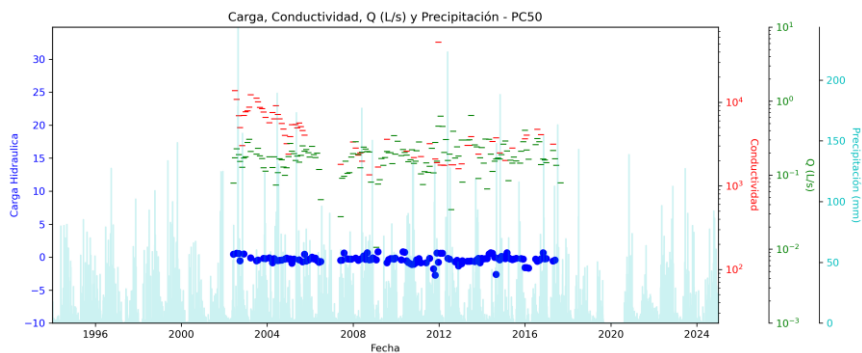
PC41



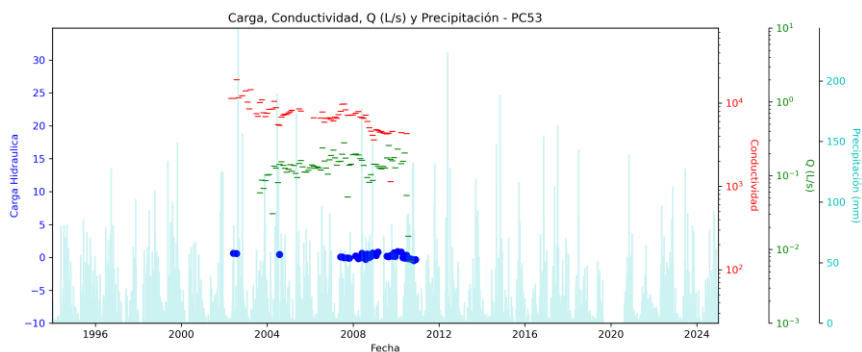
PC42



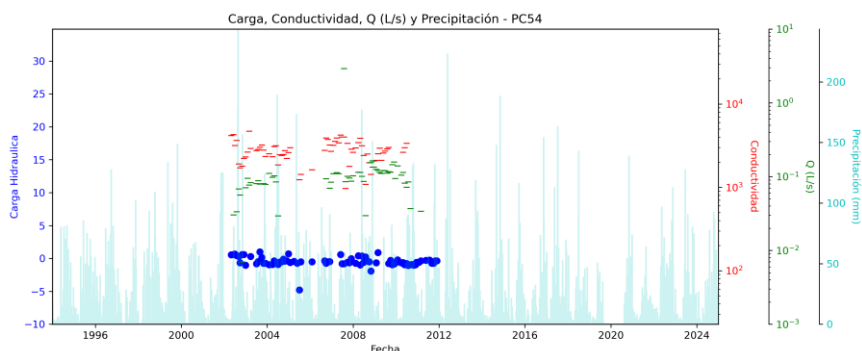
PC49



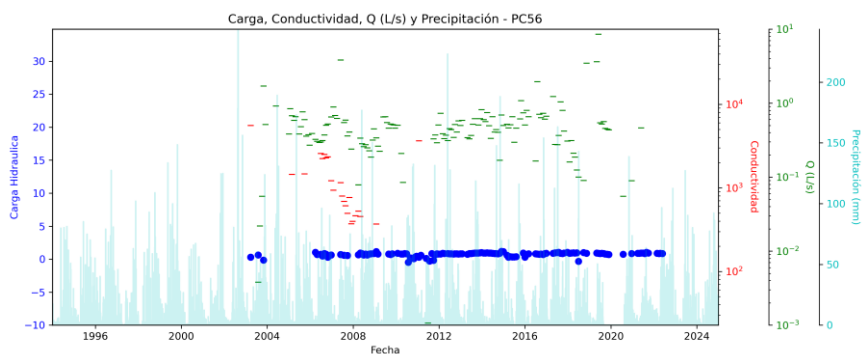
PC50



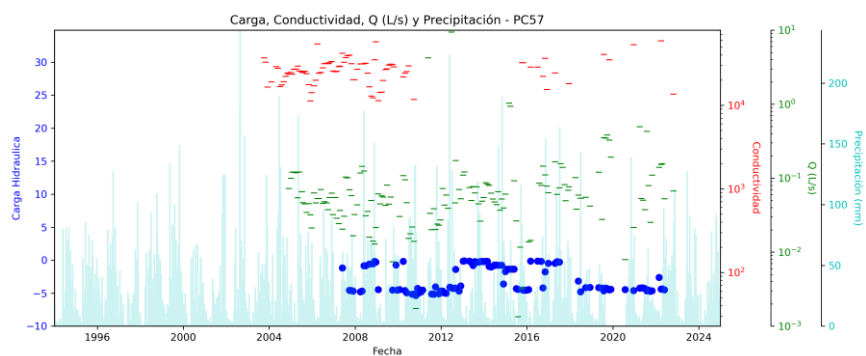
PC53



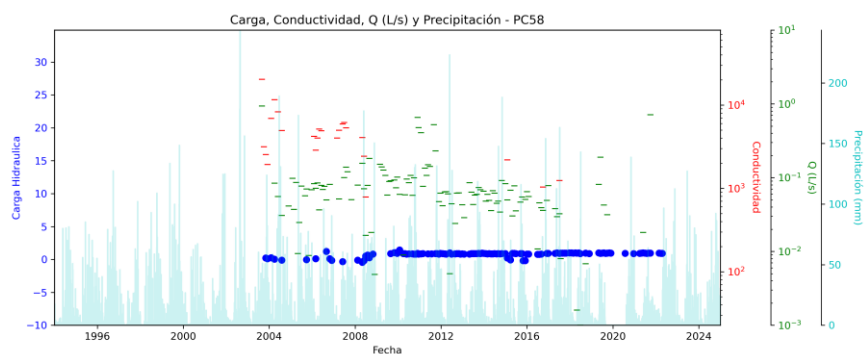
PC54



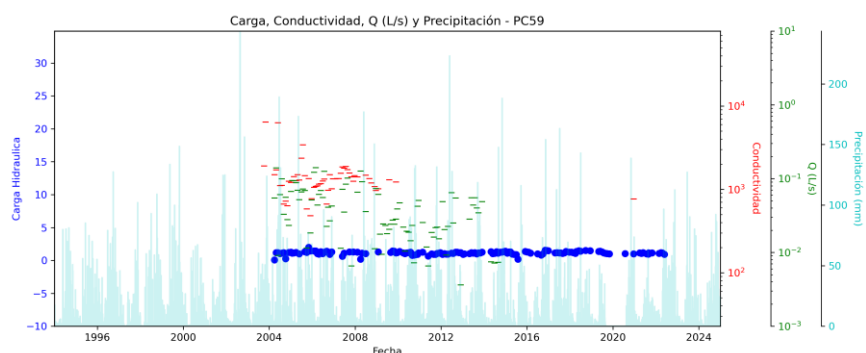
PC56



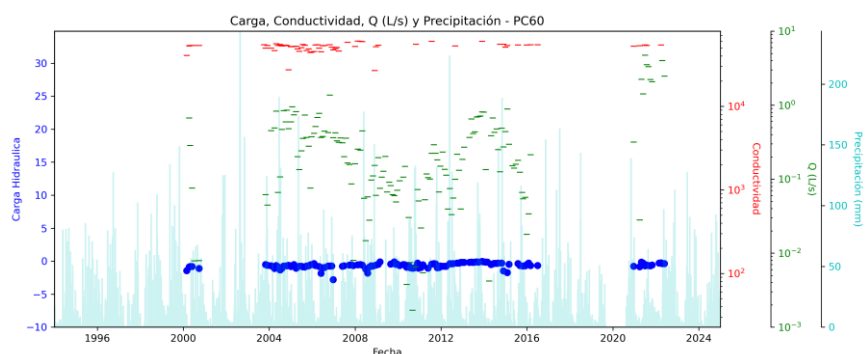
PC57



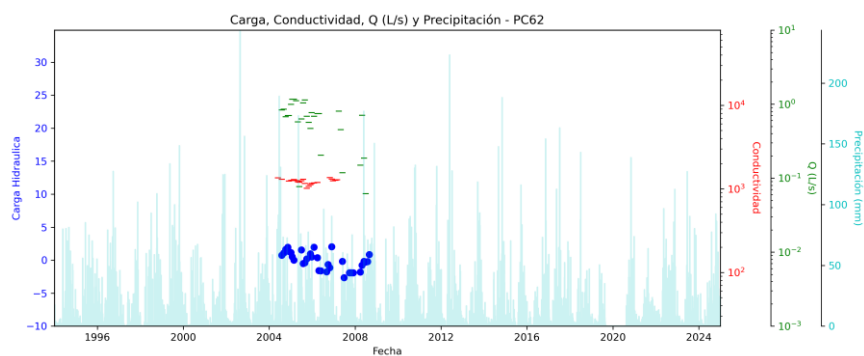
PC58



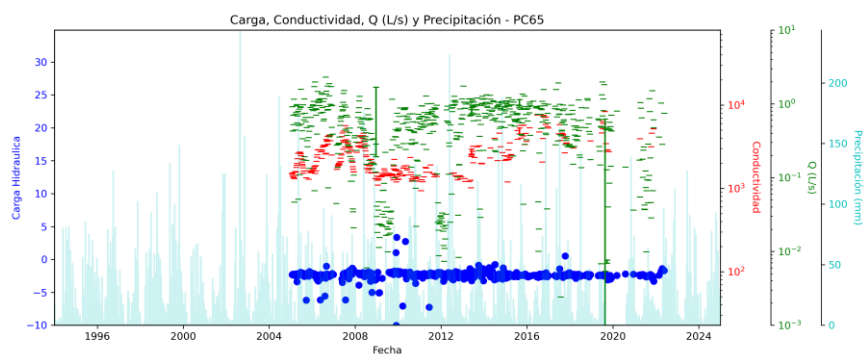
PC59



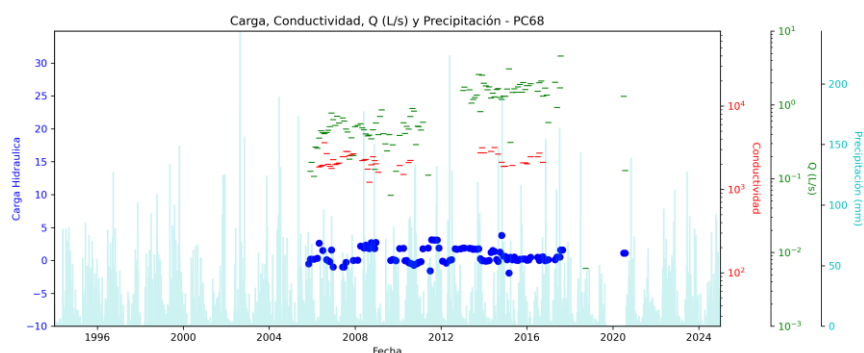
PC60



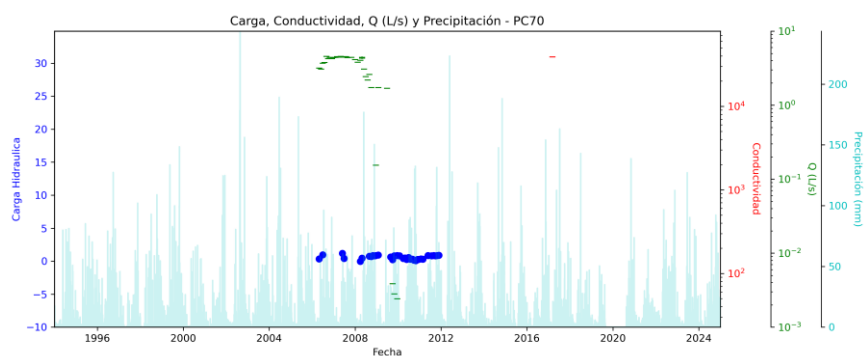
PC62



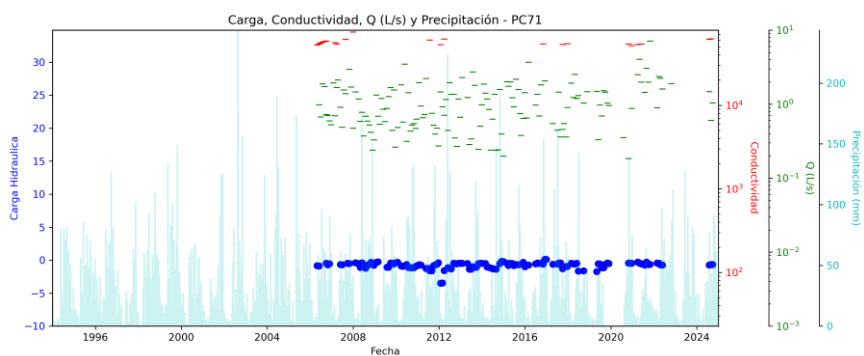
PC65



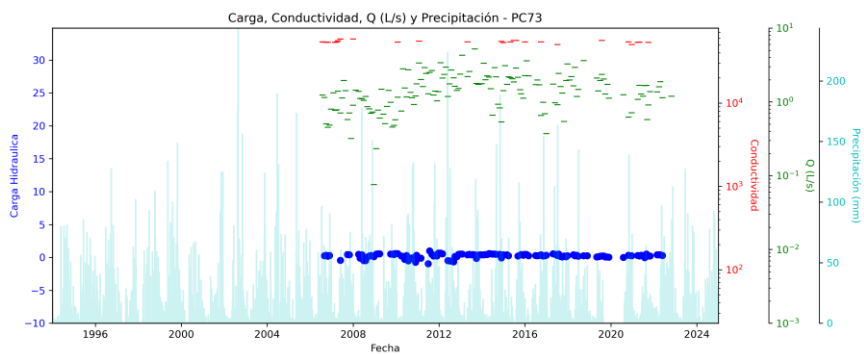
PC68



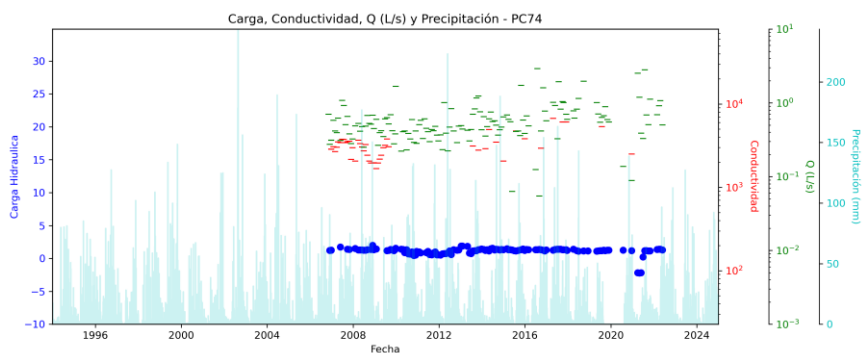
PC70



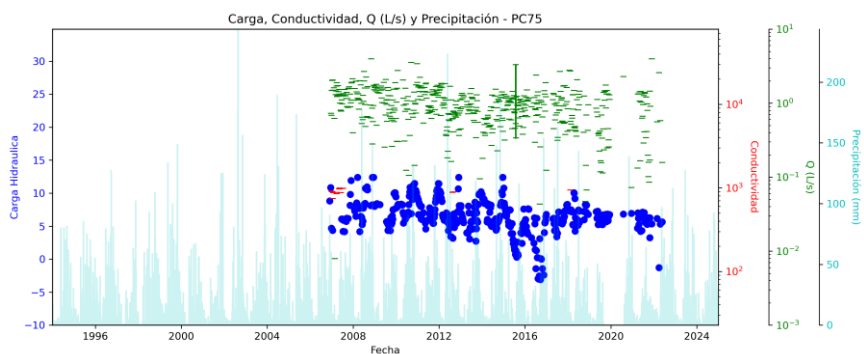
PC71



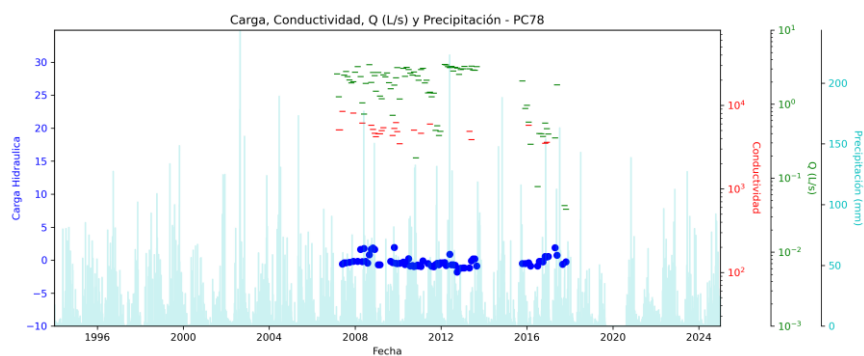
PC73



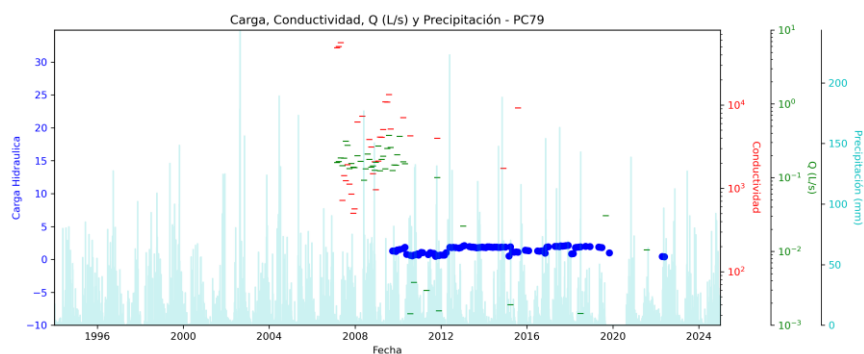
PC74



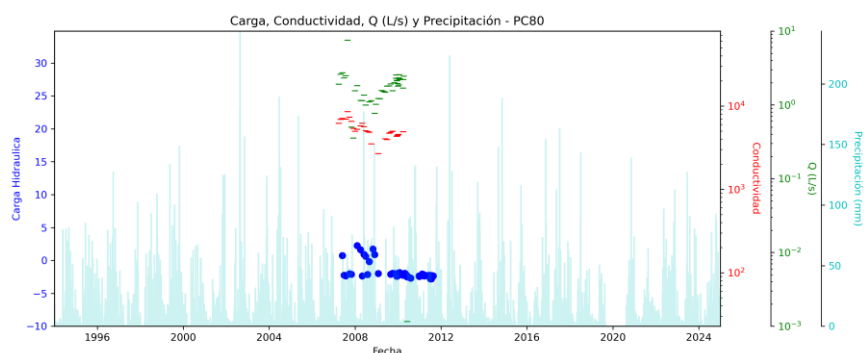
PC75



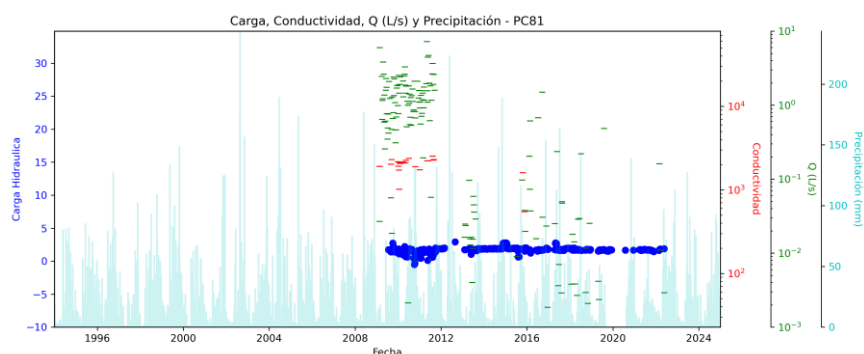
PC78



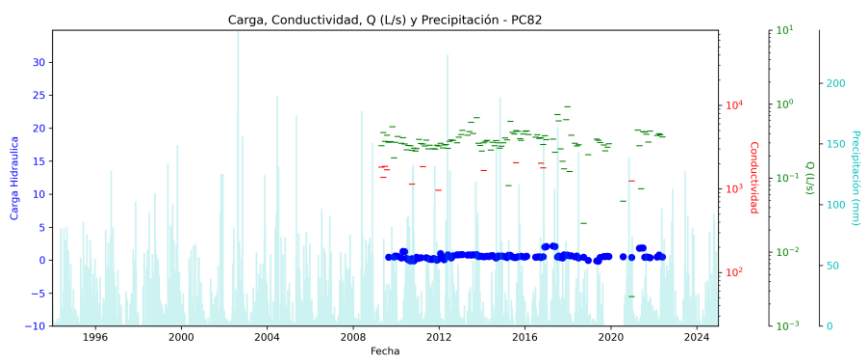
PC79



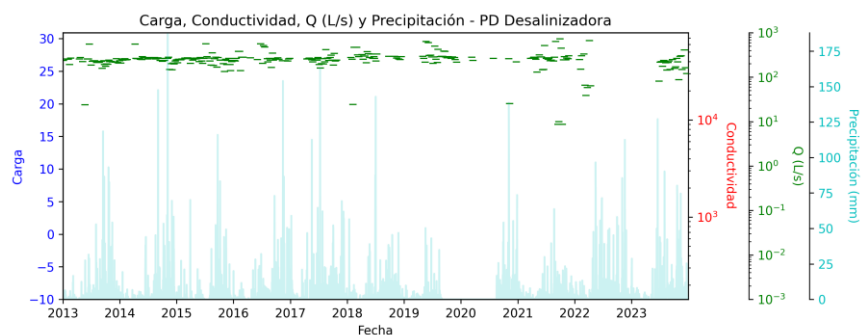
PC80



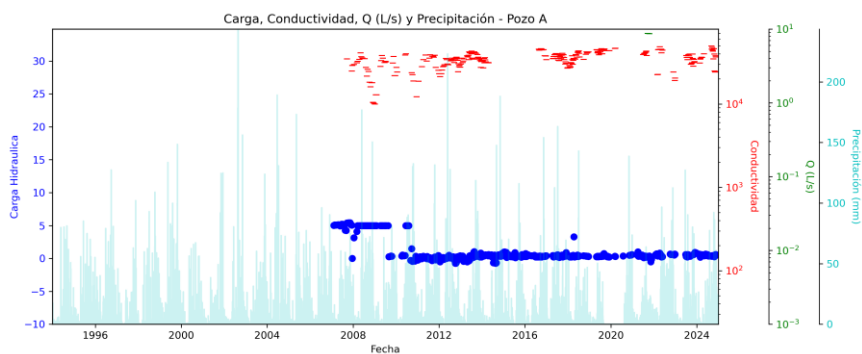
PC81



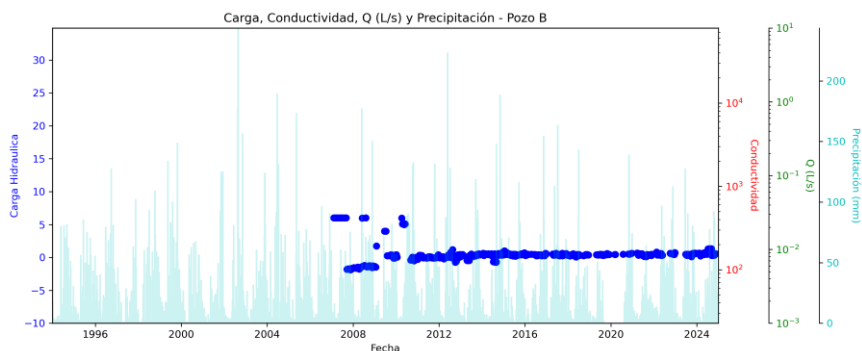
PC82



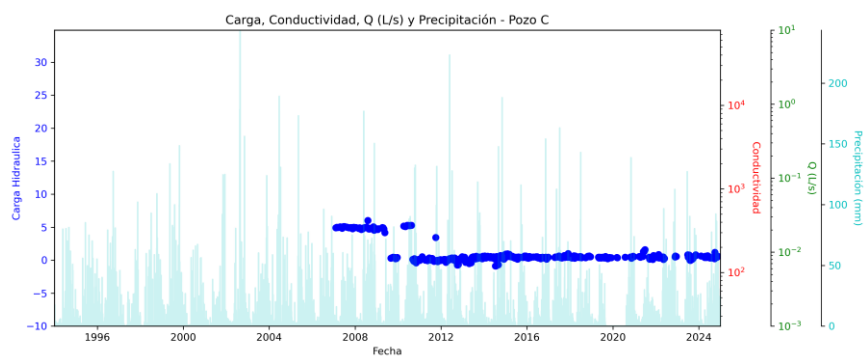
PD Desalinizadora



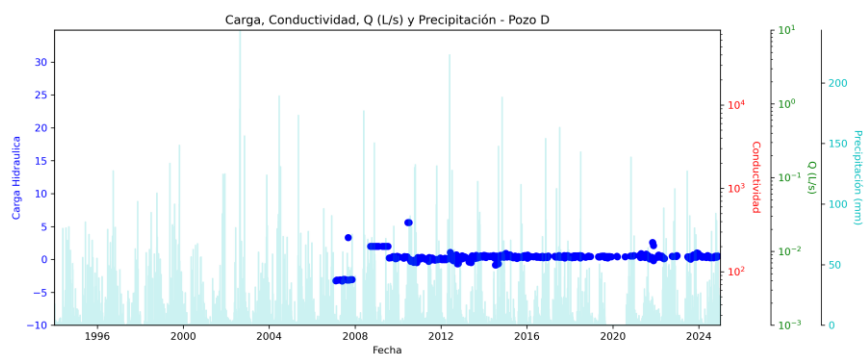
Pozo A



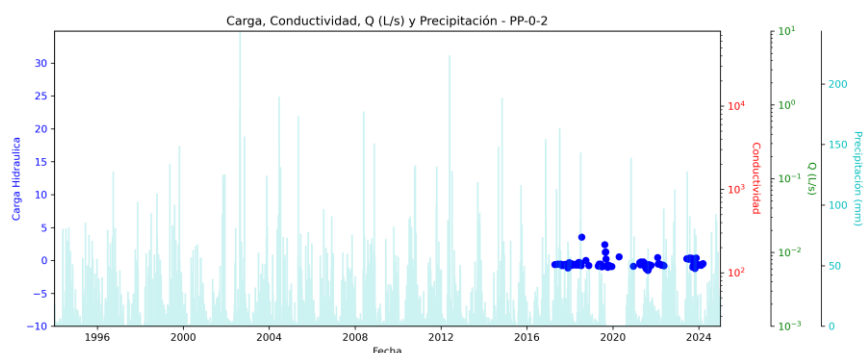
Pozo B



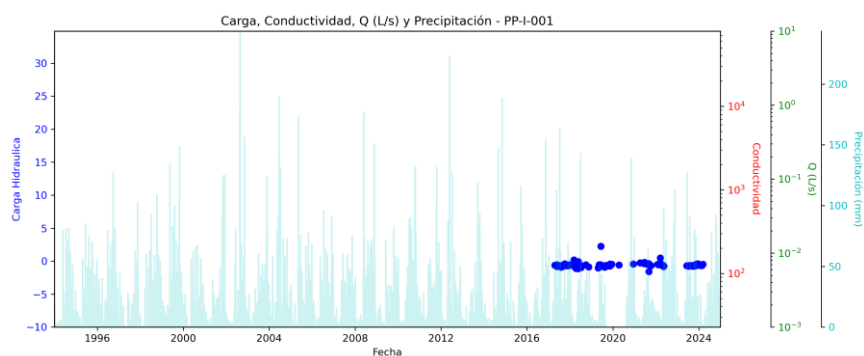
Pozo C



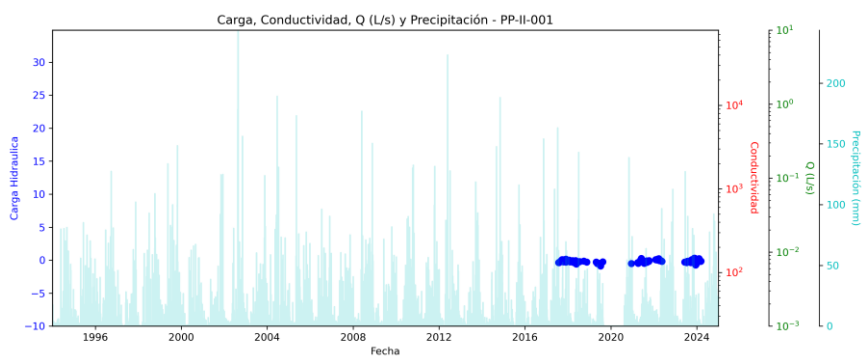
Pozo D



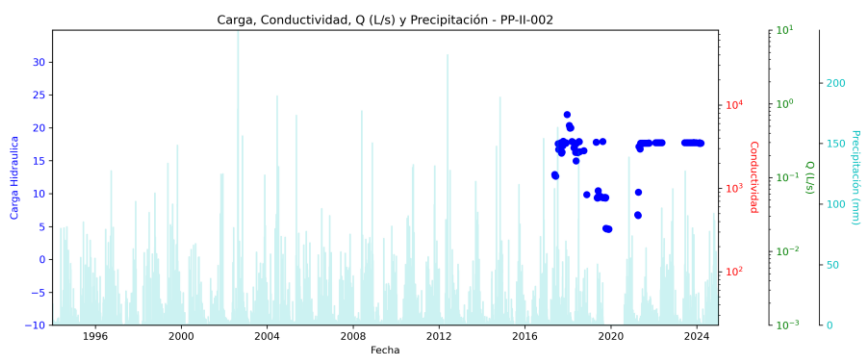
PP-0-2



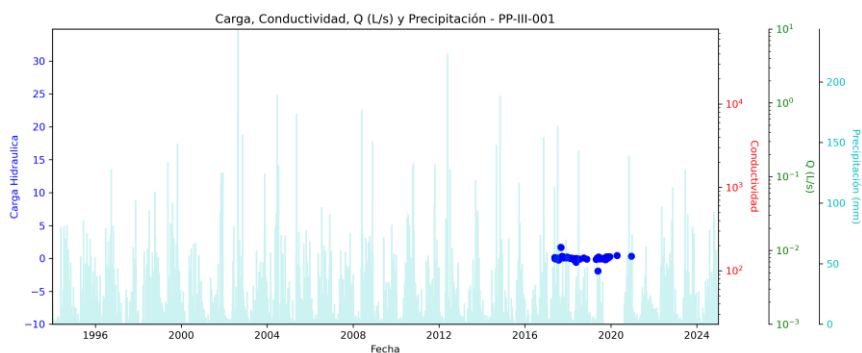
PP-I-001



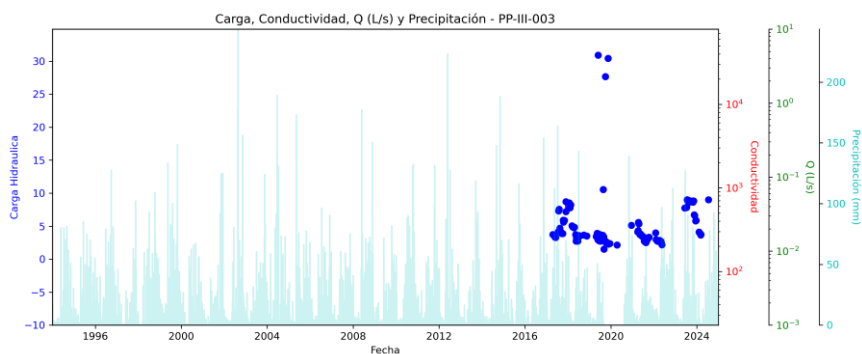
PP-II-001



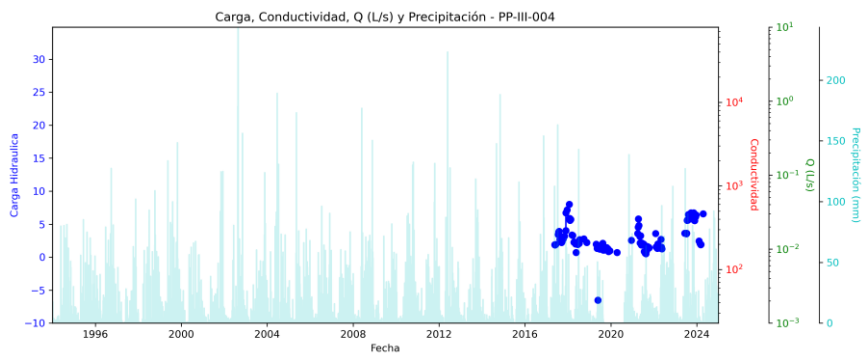
PP-II-002



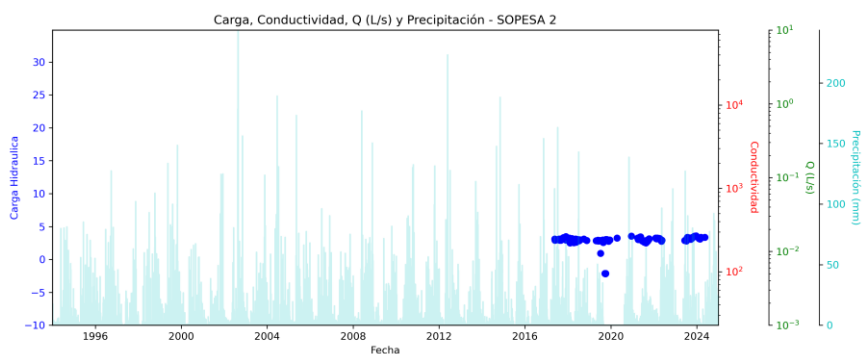
PP-III-001



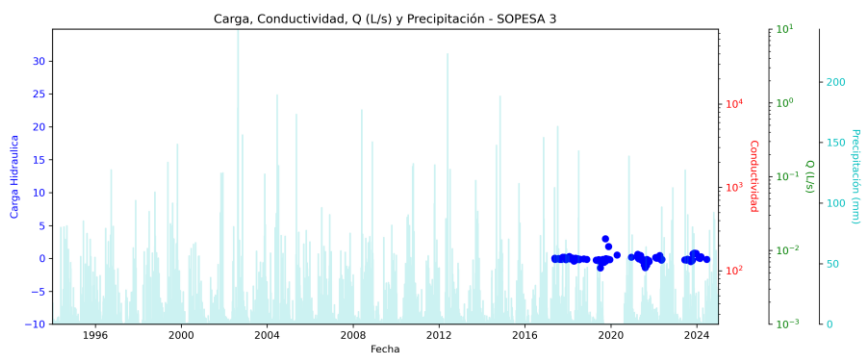
PP-III-003



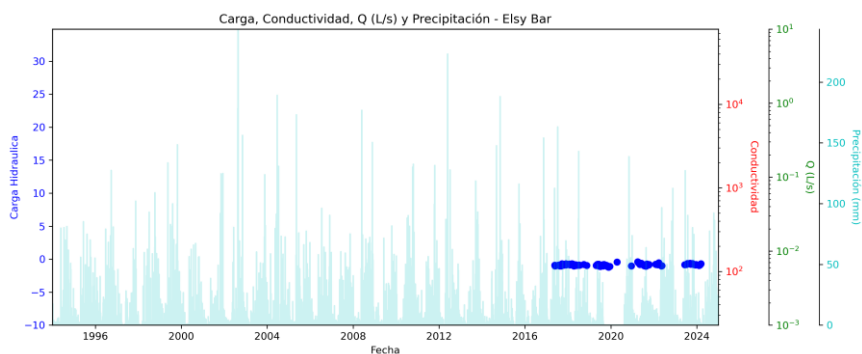
PP-III-004



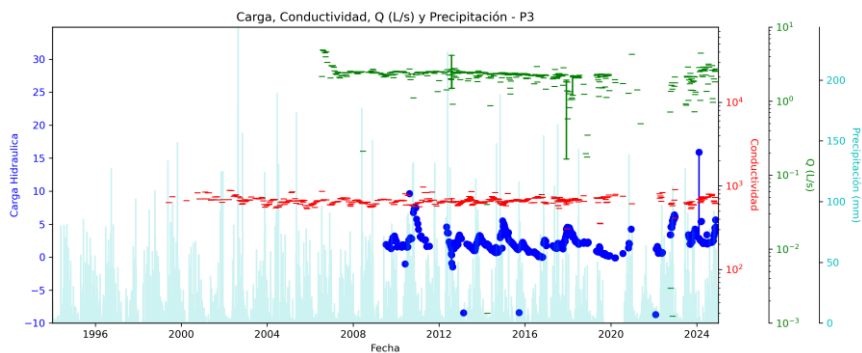
SOPESA 2



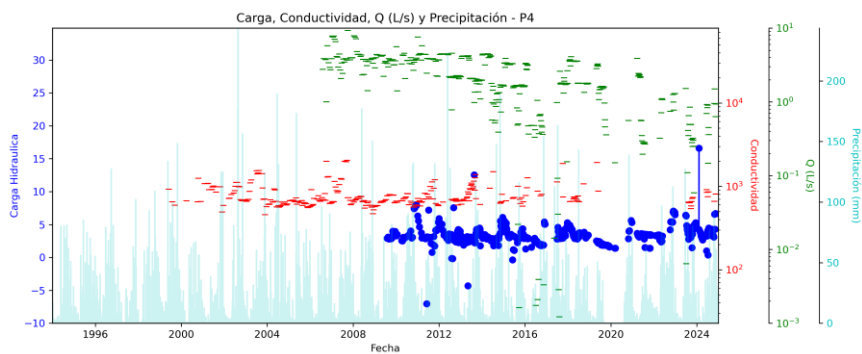
SOPESA 3



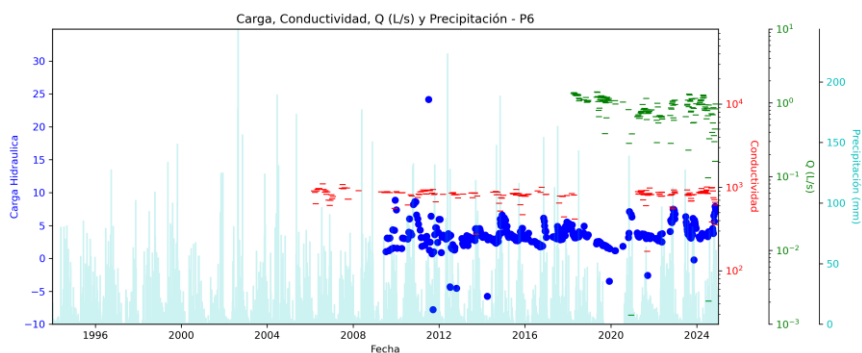
Elsy Bar



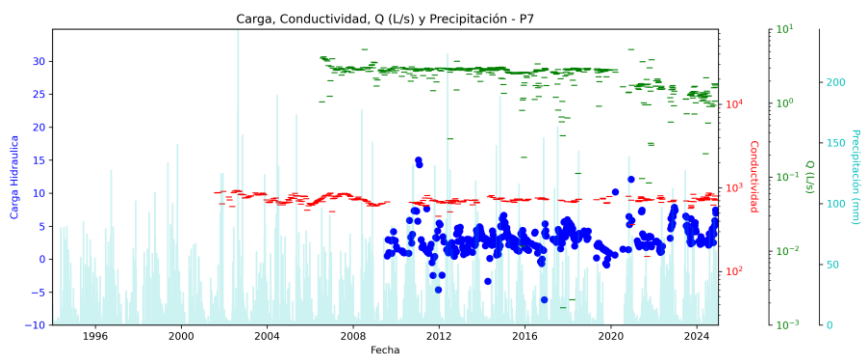
P3



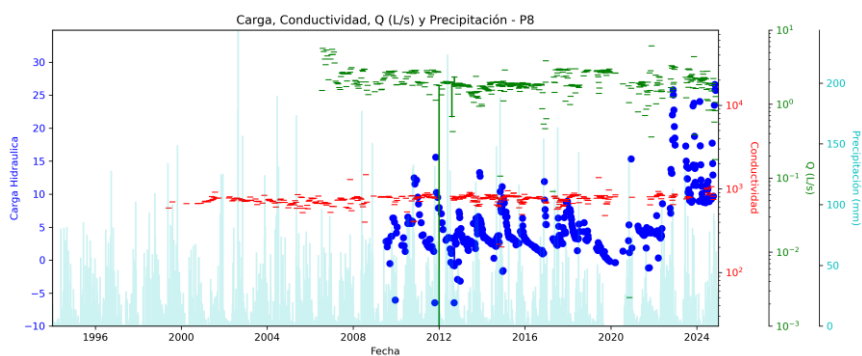
P4



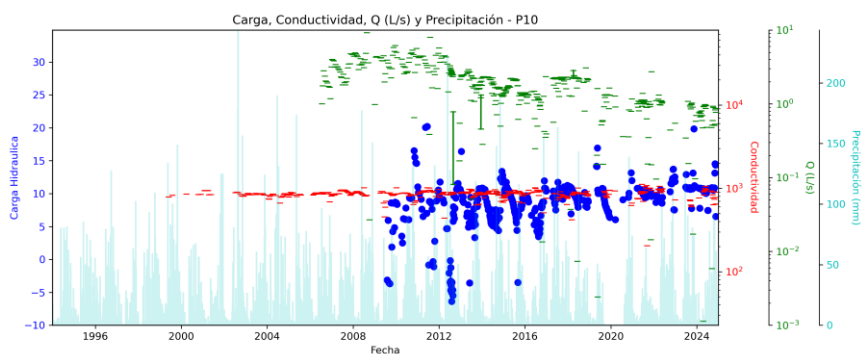
P6



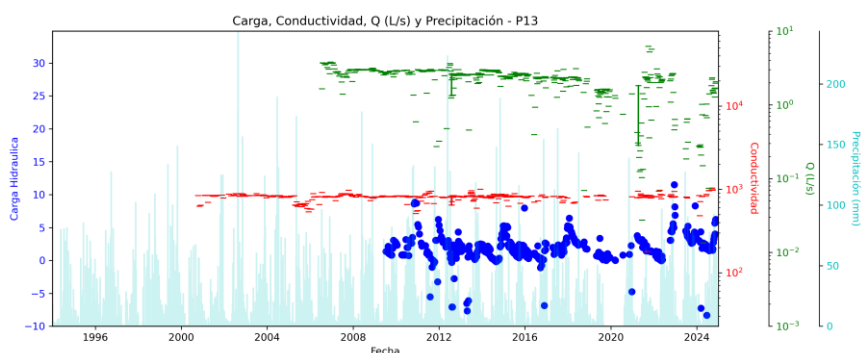
P7



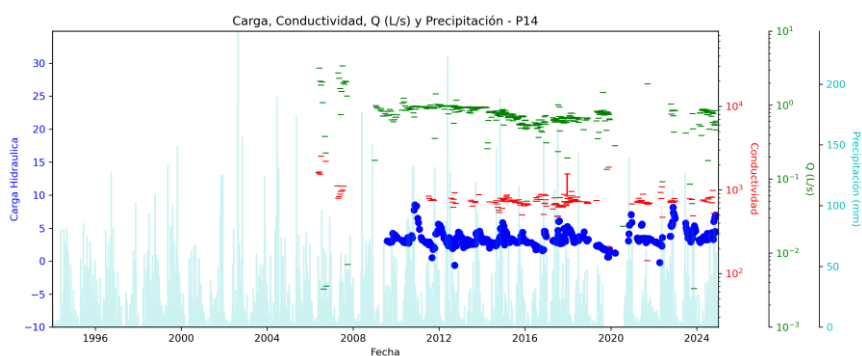
P8



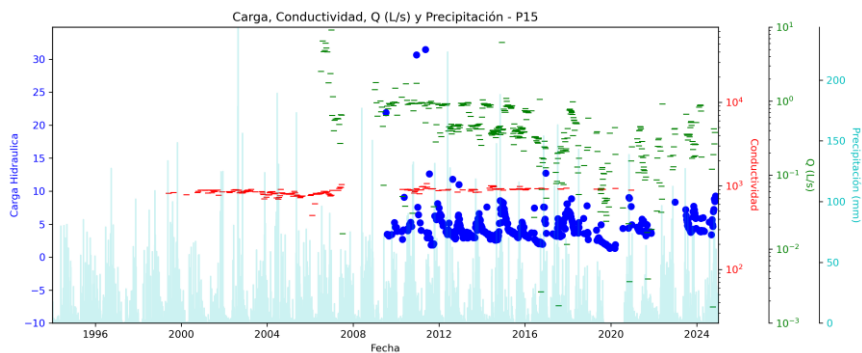
P10



P13



P14



P15