



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

VARIACIONES HIDROCLIMÁTICAS Y EFECTOS EN SISTEMAS VEGETACIONALES  
ALTOANDINOS – APLICACIÓN A SALAR DE MICHINCHA

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA,  
MENCIÓN RECURSOS Y MEDIO AMBIENTE HÍDRICO

ALBERTO EDUARDO HENSELEIT INZUNZA

PROFESOR GUÍA:

CARLOS ESPINOZA CONTRERAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

CLAUDIA MELLADO TIGRE

LUIS FELIPE SANDOVAL SANTIBÁÑEZ

ALBERTO DE LA FUENTE STRANGER

SANTIAGO DE CHILE

2022

RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL  
GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE  
LA INGENIERÍA, MENCIÓN RECURSOS  
Y MEDIO AMBIENTE HÍDRICO  
POR: Alberto Eduardo Henseleit Inzunza  
FECHA: 2022  
PROF. GUÍA: Carlos Espinoza Contreras

## VARIACIONES HIDROCLIMÁTICAS Y EFECTOS EN SISTEMAS VEGETACIONALES ALTOANDINOS – APLICACIÓN A SALAR DE MICHINCHA

Los Sistemas Vegetacionales Azonales Hídricos Terrestres - SVAHT corresponden a ecosistemas ampliamente distribuidos en la Cordillera de los Andes, y constituyen lugares de alta relevancia por su particular diversidad biológica y por el rol que representan para comunidades locales. Es necesario contar con buena información de estos sistemas para su manejo y conservación, dado que existe un potencial conflicto entre el desarrollo industrial (en particular, minería) y la protección de estos frágiles ecosistemas.

Tomando en consideración lo anterior, en el presente trabajo de tesis se plantea el desarrollo de un método que permita establecer una relación entre el nivel freático y variables climáticas con variaciones en la vegetación asociada a SVAHT, de manera de obtener un estimador de las áreas de cobertura vegetal futuras. Lo anterior aplicado en particular al caso del Salar de Michincha.

La metodología consiste en analizar la variación temporal de la vegetación en el Salar de Michincha mediante imágenes satelitales. Luego, se busca establecer relaciones entre las variaciones de la profundidad del nivel freático en algunos pozos predefinidos (de acuerdo a su ubicación con respecto a la vegetación), variables climáticas (precipitación y/o evaporación) y los cambios en áreas cubiertas por vegetación, de manera de generar un modelo/estimador de áreas de vegetación a partir de las variables antes mencionadas. Finalmente, mediante la aplicación del modelo usando niveles de escenarios futuros (generados desde el modelo hidrogeológico de Collahuasi) y de estimaciones de las variables climáticas, se generan distintas estimaciones de las coberturas futuras de vegetación.

Se comprobó un efecto de disminución (área y/o vigor) en la vegetación (por el descenso de niveles) en periodos de mayor extracción como también de recuperación cuando esta última es menor; la utilidad y las limitaciones que tiene trabajar con la serie LANDSAT y el índice NDVI para el análisis de la vegetación; que el modelo obtenido reproduce correctamente la tendencia en las áreas de cobertura de vegetación; y la sensibilidad de la estimación de áreas de cobertura de vegetación asociada, en particular, a los niveles futuros obtenidos de modelos hidrogeológicos. Se resalta la potencialidad de herramientas como la que acá se presenta para la gestión y protección de ecosistemas que se busca conservar como los SVAHT.

## **AGRADECIMIENTOS**

Antes que nada, agradecerle a mi esposa Camila. Sin su cariño, apoyo, empuje y motivación, todo este trabajo hubiera sido aún más difícil. Gracias por la compañía y el apañe, en las buenas y sobre todo en las malas durante todo el tiempo que dediqué a este Trabajo de Tesis. Te amo mucho. También a mi hija Agustina, su sonrisa iluminó y sus abrazos me dieron fuerzas en los momentos más complicados; a mi hijo Bautista, quien con sus miradas y risas nos ilumina el alma; y nuestro angelito Mateo, que desde el cielo sin duda me enviaba su apoyo.

A mi familia. Especialmente a mis padres Cristina y Alberto, que junto a su amor y apoyo incondicionales me entregaron la mejor educación posible, dejándome profundamente marcada la importancia vital de la educación en el ser humano. A mi suegra Paty, siempre con palabras de aliento para seguir adelante, y a mi suegro Álvaro, quien también me apoyó en todo momento desde arriba.

A mis amigos, mi familia elegida. En especial a Alejandro, Tomás, Damián, Agustín, Felipe M, Paula, Dianella, Felipe C, Julieta y Pablo. Gracias por su amistad incondicional. La vida es más linda y se disfruta más cuando se comparte, y compartirla con ustedes ha hecho de mi vida más feliz.

A HIDROMAS, en particular a Carlos, Mesenia y Ana María que me dieron su apoyo para poder estudiar y seguir desarrollándome profesionalmente, y a Felipe y Claudia que dedicaron tiempo a orientarme en el desarrollo de este Trabajo de Tesis.

Por último, pero no menos importante, a Dios. La Fe en Él me sostuvo y me infundió fuerzas cuando estas flaqueaban.

*“Vengan a mí los que se sienten cargados y  
agobiados, porque yo los aliviaré.  
Carguen con mi yugo y aprendan de mí,  
que soy paciente de corazón y humilde,  
y sus almas encontrarán alivio.  
Pues mi yugo es bueno, y mi carga ligera”  
Mateo 11, 28-30.*

## Tabla de Contenido

Agradecimientos .....	II
Índice de Tablas .....	VI
Índice de Figuras .....	VI
1 Introducción .....	1
1.1 Aspectos Generales .....	1
1.2 Características Generales Caso Estudio – Salar de Michincha .....	3
1.3 Objetivos .....	5
1.3.1 Objetivo Principal .....	5
1.3.2 Objetivos Específicos .....	5
2 Antecedentes del Estudio .....	6
2.1 Antecedentes Relación Área SVAHT-Recursos Hídricos .....	6
2.1.1 Características de Humedales Altiplánicos .....	6
2.1.2 Cambios en Recursos Hídricos e Impactos en Humedales .....	10
2.2 Técnicas de Análisis Espacial e Indicadores .....	13
2.2.1 Imágenes Landsat .....	13
2.2.2 Índice NDVI .....	16
2.2.3 Tipos de Modelo y Definición de Uso .....	17
2.3 Modelo Hidrogeológico de Collahuasi .....	19
3 Metodología de Trabajo Propuesta .....	20
4 Área de Estudio .....	22
4.1 Antecedentes Salar de Michincha .....	22
4.1.1 Hitos Operacionales Collahuasi y Quebrada Blanca .....	23
4.1.2 Hidrogeología .....	24
4.1.3 Vegetación .....	35
4.2 Funcionamiento Hidrogeológico del Sistema .....	38
4.2.1 Balance Hídrico .....	38
4.2.2 Modelo Hidrogeológico Conceptual .....	39

5	Análisis de Resultados .....	41
5.1	Análisis de Imágenes Satelitales .....	41
5.1.1	Resultados Análisis Imágenes Satelitales.....	41
5.1.2	Sensibilización NDVI y Cambio Temporal en las Áreas .....	48
5.2	Modelo Predictivo del Área Vegetacional a partir del Nivel Freático y Variables Climáticas....	68
5.2.1	Aspectos Generales .....	68
5.2.2	Elaboración Modelo Predictivo de Áreas Vegetacionales .....	68
5.2.3	Aplicación del Modelo a Escenarios Futuros del Modelo Hidrogeológico.....	80
5.3	Conclusiones Elaboración y Aplicación del Modelo en Salar de Michincha.....	85
6	Conclusiones y Recomendaciones .....	89
6.1	Conclusiones .....	89
6.2	Recomendaciones.....	91
7	Bibliografía.....	93
	ANEXOS .....	96
	ANEXO A.....	96
	ANEXO B .....	118

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Características Técnicas Landsat 5 .....	15
Tabla 2-2: Características Técnicas Landsat 7 .....	15
Tabla 2-3: Características Técnicas Landsat 8 .....	15
Tabla 4-1: Resumen Información Pozos Salar de Michincha y Sector Sureste .....	27
Tabla 4-2: Balance Hídrico cuenca de Michincha.....	39
Tabla 5-1: Sensibilización Índice NDVI (Verde claro: NDVI entre valor umbral 0,13 y 0,2; Verde Oscuro: NDVI entre 0,2 y 1) .....	50
Tabla 5-2: Áreas Totales y Relación Entre Área de Vegetación Más Sana y la Total .....	54
Tabla 5-3: Comparación entre Situación Inicial y Actual; Verano e Invierno Sin y Con Afectación por Extracciones .....	55
Tabla 5-4: Tipos de Especie Detectadas en Salar de Michincha; Nombre Común y Distribución Según Estudio SAG .....	57
Tabla 5-5: Comparación Verano e Invierno de 2018 (Color Verdadero).....	72
Tabla 5-6: Años a Usar para Elaboración del Modelo .....	73
Tabla 5-7: Error RMSE Normalizado, Promedio y Mediana del Error de Estimación del Modelo .....	79

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Bofedal irrigado por afloramiento de napas subterráneas. ....	8
Figura 2-2: Bofedal irrigado por escurrimiento superficial.....	9
Figura 2-3: Esquema vías de suministro hídrico de ecosistemas humedales altiplánicos.....	10
Figura 2-4: Reflexión largos de onda visible y cercano al infrarrojo en vegetación sana (izquierda) y poco sana o escasa (derecha). ....	17
Figura 4-1: Ubicación General Salar de Michincha .....	22
Figura 4-2: Detalle Hitos Geográficos Salar de Michincha .....	23
Figura 4-3: Ubicación Pozos Salar de Michincha y Sector Sureste .....	26

Figura 4-4: Evolución Temporal de Niveles en Pozos M-17, MMA-06, MMA-08, MMA-11 y M-15, y Precipitación Media Mensual Estación Ujina .....	29
Figura 4-5: Evolución Temporal de Niveles en Pozos M-19, X-2, M-10, MMA-01 y M-15, y Precipitación Media Mensual Estación Ujina .....	29
Figura 4-6: Evolución Temporal de la Profundidad del Nivel Freático – Pozos MMA (en el Salar de Michincha).....	31
Figura 4-7: Evolución Temporal de la Profundidad del Nivel Freático – Pozos M (cercañas Salar de Michincha).....	32
Figura 4-8: Extracciones Pozo P-7B de Quebrada Blanca y Profundidades Nivel Pozos MMA-02, MMA-03, M-10, M-14 y M-17 .....	32
Figura 4-9: Ubicación Estaciones Meteorológicas.....	34
Figura 4-10: Comparación Precipitaciones Estaciones Ujina y Coyacagua.....	34
Figura 4-11: Precipitación Anual Estación Ujina (Rellenada con Estación Coyacagua).....	35
Figura 4-12: Distribución Mensual Precipitación Estación Ujina.....	35
Figura 4-13: Formaciones Vegetacionales azonales en el Salar de Michincha.....	37
Figura 5-1: Serie de Tiempo (1985-2021) Áreas Cobertura Vegetacional Mediante NDVI e Hitos Cuenca .....	44
Figura 5-2: Serie de Tiempo (1985-2021) Áreas Cobertura Vegetacional Mediante NDVI e Hitos Cuenca – Detalle Áreas < 60 ha .....	45
Figura 5-3: Serie de Tiempo (1985-2021) Áreas Cobertura Vegetacional Mediante NDVI y Precipitación .....	46
Figura 5-4: Serie de Tiempo (1985-2021) Áreas Cobertura Vegetacional Mediante NDVI y Extracciones Pozo P-7/7B .....	47
Figura 5-5: Comparación Áreas Mediante NDVI y Transectos – Invierno 2014 .....	58
Figura 5-6: Comparación Áreas Mediante NDVI y Transectos – Verano 2015 .....	59
Figura 5-7: Comparación Áreas Mediante NDVI y Transectos – Otoño 2015.....	60
Figura 5-8: Comparación Áreas Mediante NDVI y Transectos – Otoño 2016.....	61
Figura 5-9: Comparación Áreas Mediante NDVI y Transectos – Invierno 2016 .....	62
Figura 5-10: Comparación Áreas Mediante NDVI y Transectos – Primavera 2016.....	63



Figura 5-11: Comparación Áreas Mediante NDVI y Transectos – Verano 2017 .....	64
Figura 5-12: Comparación Áreas Mediante NDVI y Transectos – Invierno 2017 .....	65
Figura 5-13: Comparación Áreas Mediante NDVI y Transectos – Primavera 2017.....	66
Figura 5-14: Comparación Áreas Mediante NDVI y Transectos – Verano 2018 .....	67
Figura 5-15: Puntos de Monitoreo de Nivel de Agua Subterránea Propuestos en el Salar de Michincha (puntos para modelo resaltados en rojo).....	70
Figura 5-16: Áreas de Vegetación en Salar de Michincha y Evaporación Mensuales.....	71
Figura 5-17: Variación Estacional de la Temperatura - Estación Coyacagua.....	72
Figura 5-18: Gráfico de Correlación entre Áreas Observadas y Estimadas Periodo 1985 - 2018 (en verde se marcan potenciales outlier) .....	74
Figura 5-19: Comparación entre Áreas Observadas y Estimadas Periodo 1985 - 2018 (en verde se marcan potenciales outlier).....	75
Figura 5-20: Gráfico de Correlación entre Áreas Observadas y Estimadas Periodo 1985 - 2018 – Outlier Removidos.....	77
Figura 5-21: Comparación entre Áreas Observadas y Estimadas Periodo 1985 - 2018 – Outlier Removidos .....	78
Figura 5-22: Distribución Áreas Estimadas vs Error de Estimación.....	79
Figura 5-23: Comparación entre Áreas Observadas y Estimadas con Banda de Ancho $\pm$ Percentil 95, Periodo 1985 – 2021 (años 2019, 2020 y 2021 remarcados en rojo) .....	80
Figura 5-24: Pozo M-17. Datos Observados y Proyección Situación Con y Sin Proyecto .....	81
Figura 5-25: Pozo MMA-02. Datos Observados y Proyección Situación Con y Sin Proyecto ....	81
Figura 5-26: Pozo MMA-03. Datos Observados y Proyección Situación Con y Sin Proyecto ....	82
Figura 5-27: Profundidad Niveles Pozos M-17, MMA-02 y MMA-03. Datos Observados, Proyectados Caso Base y Situación con Proyecto.....	82
Figura 5-28: Áreas Observadas y Estimadas con Banda de Ancho $\pm$ Percentil 95 para Periodo de Calibración y Para Estimaciones Caso Base .....	83
Figura 5-29: Áreas Observadas y Estimadas con Banda de Ancho $\pm$ Percentil 95 para Periodo de Calibración y Para Estimaciones Caso Proyecto.....	84

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 ASPECTOS GENERALES

Los sistemas vegetacionales azonales hídricos de altura (los cuales se agrupan bajo el concepto más general de Sistemas Vegetacionales Azonales Hídricos Terrestres - SVAHT) corresponden a ecosistemas ampliamente distribuidos en la Cordillera de los Andes. Sin embargo, pese a su vasta presencia, es un recurso muy escaso en la zona Norte y Centro Norte de Chile, constituyéndose en lugares de alta relevancia por su particular diversidad biológica y por el rol que representan para los sistemas productivos locales, basados en técnicas ancestrales (Ahumada y Faúndez, 2009). Así, pese a la hiper-aridez, radiación solar intensa, vientos de alta velocidad, hipoxia, heladas diarias y a una corta temporada de crecimiento, este tipo de vegetación está cerca de los límites hidrológicos y altitudinales para la vida vegetal en los pastizales fríos y áridos de Perú, Bolivia, Chile y Argentina.

La importancia de conservar este tipo de ecosistemas radica en que cumplen una serie de funciones asignadas por el ser humano, entre las más destacadas se encuentran: ser una fuente de aprovisionamiento de agua de bebida, aporte en forraje en cantidad y calidad óptima para la crianza de ganado y para uso industrial (Ahumada y Faúndez, 2009). Por otro lado, también es necesario considerar otras funcionalidades de estos ecosistemas tales como fuente de biodiversidad y *pool* genético, corredores biológicos -especialmente para aves migratorias- y reguladores de ciclos hidrológicos.

Los humedales altoandinos juegan un rol crítico manteniendo una diversidad única de una biota poco común y endémica de la Cordillera de los Andes, con especies de mamíferos y aves que dependen de ellos para pastar, anidar y beber agua (Que, F., Warner, B., Aravena, R. y Espinoza, D.2006). Por otra parte, comunidades indígenas de Aymaras y Atacameños dependen directamente de los humedales en esta región de condiciones tan extremas que casi impiden la habitación humana.

Es necesario contar con buena información de estos sistemas para su manejo y conservación, dado que hay una creciente presión tanto sobre el agua como en los recursos biológicos asociados. Así, existe un potencial conflicto entre el desarrollo industrial (en particular, minería) y la protección de estos frágiles ecosistemas. Estos se encuentran protegidos en Chile (de manera primordial mediante la suscripción a la Convención de Ramsar a través del Decreto Supremo N°771 de 1981), lo que implica que en regiones del norte de Chile (como Tarapacá y Antofagasta) se debe tener en especial consideración a los humedales y a sus áreas de recarga de agua subterránea. A esto se debe agregar un especial interés de la autoridad, particularmente la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA), en la protección de estos ecosistemas, lo que ha llevado a un aumento sustantivo en la cantidad de recursos destinados al estudio y generación de herramientas de análisis para la gestión y protección de humedales altoandinos.

El área de estudio que abarca el presente trabajo corresponde al Salar de Michincha, el cual se ubica en la Región de Tarapacá, aproximadamente a 185 km al sureste de la ciudad de Iquique. La vegetación presente al sur del Salar depende de las aguas subterráneas que se abastecen a partir de las lluvias que se dan en las zonas altas aledañas hacia el este y el sur, que posteriormente infiltran. Las aguas subterráneas, hasta el año 2003, afloraban en un punto (conocido como vertiente Michincha) al sur de la cobertura vegetal, aguas que circulaban superficialmente y alimentaban a la vegetación. Desde 2003 en adelante (y constatado de manera oficial por las autoridades en 2004), debido a la intensidad de las extracciones, los niveles se deprimieron y la vertiente se secó, por lo que desde ese año funciona una reposición manejada por Collahuasi que de manera artificial y superficial (extrayendo agua desde un pozo cercano) alimenta la vertiente. Debido a la intervención antrópica del sistema (Quebrada Blanca extrae agua desde 1993, en tanto que Collahuasi lo hace desde el último trimestre de 2004), se cuenta con planes de monitoreo establecidos a través de redes de monitoreo y compromisos asumidos con la autoridad para la conservación de la vegetación.

En la actualidad, hay variados métodos para el monitoreo del estado de conservación de humedales a través de percepción remota. Esta permite la evaluación de cambios de uso del suelo y variaciones de la cobertura vegetal, y también en los ecosistemas de los humedales a partir de cambios hidrológicos (Guo, M., Li, J., Sheng, C., Xu, J., & Wu, L. 2017). El análisis multitemporal de imágenes satelitales es utilizado usualmente para identificar y estimar los cambios en el área cubierta por vegetación, cambios que se pueden generar abruptamente debido a eventos disruptivos, como por ejemplo inundaciones, incendios o intervenciones antrópicas (Li, D., Lu, D., Wu, M., Shao, X., & Wei, J., 2017).

En relación con lo anterior, y con el objetivo de detectar las áreas cubiertas de vegetación y cuantificar las áreas de vegetación, se trabajó con el *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI). Hay varios estudios desarrollados en zonas áridas o semi-áridas, en los cuales se han obtenido correlaciones entre la cobertura de vegetación y la precipitación, con resultados que permiten predecir la cobertura vegetal, y que tienen aplicaciones para la conservación o manejo de humedales (Corvalán S, J., Román F, C. y Paneque C, M., 2019). En el contexto del presente trabajo, se usó el NDVI para la detección de la cobertura de vegetación en humedales altoandinos y las áreas asociadas. Diferentes autores han subrayado que el NDVI es uno de los índices más importantes para evaluar el estado de la vegetación, dado que está correlacionado con la fotosíntesis y con la producción primaria (Corvalán S, J., Román F, C. y Paneque C, M., 2019).

En el presente Trabajo de Tesis se buscó determinar los cambios de la cobertura vegetal en el Salar de Michincha entre 1985 y 2021 mediante el uso del índice NDVI estimado a partir de imágenes LANDSAT, y elaborar un modelo o estimador a partir de la combinación de predictores para estimar la superficie cubierta de vegetación a partir de información meteorológica y de los datos de la red de monitoreo de aguas subterráneas, y poder hacer proyecciones futuras de las áreas de cobertura vegetal. Lo anterior, para poder explicar los efectos sobre estos ecosistemas importantes y frágiles que constituyen los SVAHT para ciertas condiciones a partir de los resultados obtenidos, y ayudar a prevenir la profundización de tales efectos en el futuro. Esto, en

el marco de que la autoridad ambiental del país en los últimos años ha impuesto un objetivo claro de protección y mínimo impacto en este tipo de ecosistemas.

## **1.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES CASO ESTUDIO – SALAR DE MICHINCHA**

El área de estudio se ubica en la cuenca del Salar de Michincha, la cual tiene una superficie aproximada de 278 km<sup>2</sup>, en tanto el salar tiene un área de 2,5 km<sup>2</sup> (ver Figura 4-1 y Figura 4-2). El Salar de Michincha se ubica a una altitud media de 4.378 msnm en la Cordillera de los Andes, en la zona altiplánica de la Región de Tarapacá en el extremo norte de Chile, cerca de la frontera con Bolivia (Arcadis, 2018). El área corresponde a un desierto seco de gran altitud, con precipitaciones infrecuentes, pero ocasionalmente muy intensas, temperaturas frías y muy poca vegetación.

Corresponde a un sistema cerrado superficialmente, donde la precipitación que cae permanece en éste, abandonando el sistema únicamente por flujos subterráneos o evaporación (es decir, sin conexión superficial con cuencas vecinas). Sus principales aportes provienen de las quebradas que descargan hacia la Pampa Pabellón y a los Carcanales de Ujina y Michincha, y que se activan en la estación húmeda. Los cerros de Michincha, Alconcha y Yabricollita son las laderas que ofrecen mayor despliegue para los aportes a estos sectores. En la zona más plana se desarrollan escurrimientos superficiales de carácter semipermanente en las quebradas de Jachu-Ujina, Represa y Yabricollita, todas las cuales drenan hacia el Salar de Michincha (Arcadis, 2018).

La cuenca queda limitada al sur por diferentes elevaciones volcánicas que separan el Salar de Michincha del Salar de Alconcha, coincidiendo parcialmente con el límite regional con la Región de Antofagasta. Por la parte este, la cuenca queda limitada por los edificios volcánicos de la Cordillera de los Andes donde se encuentra la frontera entre Chile y Bolivia. La parte norte queda limitada también por elevaciones volcánicas que separan la cuenca del Salar de Michincha de la cuenca del Salar de Coposa. La parte oeste está limitada por formaciones del sistema precordillerano de Collahuasi. Estas formaciones que limitan la cuenca presentan altitudes mayores que las del centro de la cuenca, constituyendo la divisoria hidrográfica de la cuenca.

Tal como se mencionó, la cuenca del Salar de Michincha se encuentra afectada por la intervención antrópica propia de la minería. Así, se tiene que en el año 1993 se inicia la extracción de recursos subterráneos en la cuenca de Michincha por parte de Quebrada Blanca (QB), en tanto que Collahuasi inicia las extracciones en el mismo sector en el último trimestre de 2004, primero para abastecimiento de agua a la operación y luego en 2005 para la recuperación de aguas infiltradas desde el Depósito de Relaves Pampa Pabellón. Por otro lado, el desaguado del rajo Ujina por parte de Collahuasi en la cuenca de Michincha comenzó 1998. El desaguado del rajo Rosario, por su parte, ubicado en la subcuenca Huinquintipa, comenzó en 2002. En la actualidad, Collahuasi cuenta con derechos de explotación de aguas subterráneas por 363,5 l/s, en tanto que Quebrada Blanca cuenta con 315,9 l/s de los cuales 100 l/s son usados actualmente por Collahuasi por un convenio suscrito entre ambas.

Collahuasi cuenta con la autorización ambiental para el uso de 333 l/s de agua subterránea para su operación en la cuenca de Michincha, establecido en las siguientes resoluciones de calificación ambiental:

- Res. Ex. N° 167/2001 proyecto “Expansión 110 Ktpd, Planta Concentradora Collahuasi” autoriza un caudal máximo a extraer de 80 l/s por la vida útil del proyecto estimada en 25 años a partir del año 2004 (2028), incluyendo el desaguado del rajo Ujina.
- Res. Ex. N° 100/2003 proyecto “Optimización Collahuasi” disminuye la vida útil de proyecto a 24 años (2027) y autoriza extracciones en Michincha por un caudal máximo adicional de 253 l/s.

Es necesario señalar que, originalmente, afloraba en el extremo sureste del Salar la vertiente Michincha, la cual luego escurría y alimentaba la vegetación de la zona. La vertiente deja de aflorar aproximadamente en 2003 producto de las extracciones de agua subterránea, previo al inicio del bombeo de Collahuasi. Así es que, desde 2005 las aguas extraídas de uno de los pozos de Michincha (5 l/s) son utilizadas para la mitigación de la vertiente Michincha, como parte de los compromisos ambientales adquiridos por Collahuasi (Res. Ex. N° 167/2001). El flujo desde este pozo se envía en forma directa a la vertiente Michincha mediante tubería enterrada de aproximadamente 1,1 km de largo.

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 Objetivo Principal**

- Desarrollo de una metodología que establezca la relación entre la profundidad del nivel freático y variables climáticas (precipitación y evaporación) con cambios en formaciones vegetacionales azonales altoandinas (SVAHT), que permita generar un modelo o estimador de las áreas futuras de vegetación. Aplicación en el Salar de Michincha.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Estudio de la variación de la vegetación (área, vigor) en el tiempo en la zona del Salar de Michincha, mediante el análisis de imágenes satelitales.
- Establecer relaciones entre las variaciones de la profundidad del nivel freático, variables climáticas (precipitación y/o evaporación) y cambios en la superficie cubierta por vegetación.
- Generación de un modelo o estimador que relacione la profundidad del nivel de agua y variables climáticas con cambios en la cobertura de vegetación.
- Aplicación del modelo o estimador generado utilizando niveles de escenarios futuros y estimaciones de las variables climáticas, y análisis de las situaciones resultantes respectivas.
- Establecer un set de recomendaciones generales para trabajos futuros de manera de ampliar y profundizar herramientas de este tipo.
- Descripción del funcionamiento y características tanto del sistema hidrogeológico como de la meteorología en zona de interés del Salar de Michincha.

## **2 ANTECEDENTES DEL ESTUDIO**

### **2.1 ANTECEDENTES RELACIÓN ÁREA SVAHT-RECURSOS HÍDRICOS**

Los humedales son subsistemas límnicos integrados a cuencas hidrográficas, incluidos pantanos, marismas, lagos, vegas, bofedales, salares, pastizales húmedos, turberas y estuarios (Castro R., R., Altamirano A., T., 2013). Un subgrupo de estos corresponde a los humedales altoandinos, los cuales se ubican en la cordillera, en cuencas sin salida al mar, en una red hidrológica dibujada por la geología de los Andes, predominando los humedales tipo salares, lagunas andinas, vegas y bofedales (MMA, 2022). Este tipo de humedales mantienen una diversidad biológica única y se caracterizan por un alto nivel de endemismo, tanto de especies animales como vegetales, terrestres y acuáticas. Además, constituyen un refugio y zonas de reproducción de una gran cantidad de especies con problemas de conservación, por lo que juegan un rol vital en el desarrollo de las cuencas andinas y de los sistemas hidrográficos que sostienen actividades de importancia económica y social (Castro R., R., Altamirano A., T., 2013).

Como se dijo anteriormente, los humedales altoandinos, que constituyen los Sistemas Vegetacionales Azonales Hídricos Terrestres (SVAHT), son ecosistemas frágiles, escasos y con un endemismo relevante (Ahumada M, Aguirre F, Contreras M, Figueroa, A 2011). Han sido utilizados históricamente por los grupos humanos, y desde hace varias décadas por sectores relevantes de la economía, con la minería en un puesto primordial entre ellos. Tal fragilidad está asociada a causas naturales, como el cambio en el régimen pluviométrico, y también a causas antrópicas, como las actividades de extracción de agua para minería o pastoreo excesivo. El desconocimiento de la dinámica de estos humedales y su tendencia en el tiempo influyen en la fragilidad a que se encuentran expuestos, pero en la actualidad se cuenta con tecnología y datos suficientes para avanzar en su análisis y comprensión, de manera de contener y (cuando sea posible) revertir las pérdidas que han sufrido estos sistemas en el país. Así, la mayoría de estos sistemas representan unidades pequeñas, dispersas, asociadas a cursos de agua, los que son, en este sentido, un buen indicador de la estabilidad de los regímenes hídricos. Dado lo anterior, y por la biodiversidad que representan, toda superficie es relevante y significativa (Castro R., R., Altamirano A., T., 2013).

#### **2.1.1 Características de Humedales Altiplánicos**

Los humedales de altura corresponden a sistemas ecológicos azonales hídricos, correlacionados con un aporte hídrico permanente y constante influenciados principalmente por las precipitaciones estivales (fines de primavera, verano, inicios de otoño). La vegetación se presenta en ambientes normalmente árido-fríos, en medio de matrices arbustivas o herbáceas de escaso o bajo cubrimiento (bajo 50% normalmente) y baja estratificación (habitualmente inferiores a 1 m) resaltando por su mayor actividad vegetativa y sus mayores cubrimientos (normalmente por encima de 50%). Sumado a esto, corresponden a los sistemas de mayor productividad en las áreas que se ubican,

pese a su menor superficie, constituyéndose así en elementos funcionales de alta significación para los ecosistemas relacionados (Ahumada M., Faúndez L, 2009).

Entre los agentes forzantes que determinan la presencia de humedales, el aporte hídrico es el más importante, existiendo una clara dependencia entre aporte hídrico y vegetación azonal hídrica, la que es sustentada por una serie de interrelaciones, pueden explicarse a través de las siguientes formas de suministro hídrico (Ahumada M., Faúndez L, 2009):

a) Suministro hídrico determinado por presencia de acuífero subterráneo:

La vía de suministro hídrico permite agrupar las siguientes modalidades de aporte de agua:

- Afloramientos hídricos a través de surgencias, tales como vertientes, las que permiten la presencia de una laguna de agua dulce, que en algunos casos es sucedida por lagunas de agua salada (lagunas someras de evaporación); afloramientos canalizados, los que después de un largo tramo alimentan lagunas de agua dulce y/o salada; surgencias difusas los que corresponden a afloramientos de bajo caudal que escurren lentamente irrigando la superficie del suelo y en función del grado de hidromorfismo que generan en el suelo, determinan la presencia de vegetación más o menos hidrófila, pudiendo variar desde la composición de bofedal a pajonal hídrico salino.
- Suministro hídrico por ascenso capilar desde el acuífero; en este caso, el factor que determina la presencia del humedal está dado por la cercanía de la napa a la superficie del sustrato. Sin embargo, las variaciones intra e interanuales quedan determinadas por la conjugación de variables climáticas (temperatura y humedad fundamentalmente). Mientras mayor sea el aporte e influencia hídrica de la napa, más hidrófilo es el sistema vegetacional asociado al humedal.

Un ejemplo de bofedal alimentado por este tipo de suministro se presenta en la Figura 2-1.



**Figura 2-1: Bofedal irrigado por afloramiento de napas subterráneas.**



*Fuente: Ahumada M., Faúndez L, 2009.*

b) Suministro hídrico determinado por cursos de aguas superficiales:

El aporte hídrico en este caso está dado por ríos superficiales que atraviesan planicies en las que se desarrolla vegetación hidromorfa en las proximidades, sea por inundación o por infiltración lateral. Un ejemplo de bofedal alimentado por escurrimiento superficial se presenta en la Figura 2-2.

**Figura 2-2: Bofedal irrigado por escurrimiento superficial.**

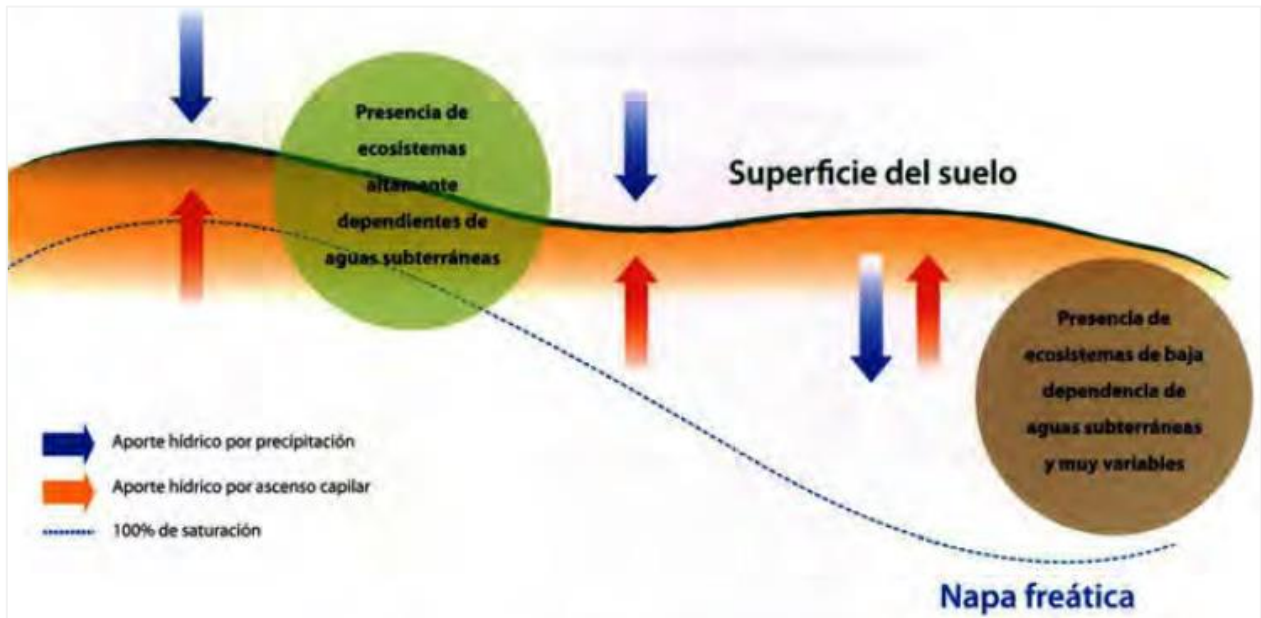


*Fuente: Ahumada M., Faiúndez L, 2009.*

Por último, en la Figura 2-3 se observa que mientras más somera (es decir, más cerca de la superficie) se ubique la napa freática, la humedad del suelo que determina la presencia de especies vegetales hidromórficas es más estable e influenciada principalmente por el ascenso capilar desde la zona saturada en profundidad o por las surgencias que la presión del acuífero determine, lo que irriga la zona de raíces de las plantas.

En áreas con el nivel freático superficial, es posible encontrar formaciones de bofedal no salino, pajonal hídrico no salino y vega (salina y no salina). A medida que el nivel freático se profundiza, la superficie cubierta con sales aumenta, en tanto que la vegetación presente es del tipo pajonal o vega salinos.

Figura 2-3: Esquema vías de suministro hídrico de ecosistemas humedales altioplánicos



Fuente: Ahumada M., Faúndez L, 2009.

### 2.1.2 Cambios en Recursos Hídricos e Impactos en Humedales

Los humedales son áreas donde el agua es el factor primario en el control del medioambiente y la vida animal y vegetal asociada. Aunque el área global de humedales corresponde sólo a un 6,2% - 7,6% de la superficie terrestre (Di L, Chunxiang C, Wei C, Xiliang N. Rong T and Xiaojun X, 2017), el rol de éstos es prominente en la provisión de un amplio rango de servicios de los ecosistemas, incluyendo suministros de agua dulce y subterránea, alimentos y materiales de construcción, biodiversidad, mitigación de inundaciones y sequías, control de la erosión y mitigación de la contaminación de aguas (Secretaría de la Convención de Ramsar, 2016). Sin embargo, entre un 64% - 71% de las pérdidas de humedales en el mundo han ocurrido durante el siglo XX y principios del siglo XXI (Davidson, N.,2014).

Descritos anteriormente, estos cambios en los humedales han sido seriamente afectados tanto por el cambio climático como por extracciones de agua para actividades antropogénicas. Adicionalmente, la mala gestión y el mal uso también someten a los humedales a daños y degradación, particularmente en regiones con precipitaciones bajas o irregulares, dado que estas áreas experimentan conflictos significativos entre uso del agua y protección de los humedales. Tomando en consideración los importantes beneficios de mantener los ecosistemas de humedales saludables, muchas políticas se han creado y financiado con la intención de proteger o restaurar humedales degradados, particularmente humedales naturales en regiones áridas y semi-áridas que son más vulnerables a bajas precipitaciones y alta evaporación. Chile, en específico, adhiere a la Convención RAMSAR en 1981, contando en la actualidad con 16 humedales de importancia internacional (Sitios RAMSAR), que cubren 363.927 hectáreas (<https://www.ramsar.org/es/humedal/chile>). Además, en 2003 establece la Estrategia Nacional de

Biodiversidad, y como parte fundamental de esta se establece en 2005 la Estrategia Nacional para la Conservación y Uso Racional de los Humedales en Chile. En 2004, se establece la Estrategia Regional de Humedales Altoandinos juntos a Argentina, Perú, Bolivia, Ecuador, Venezuela, Colombia y Costa Rica. En el año 2007, en tanto, se publican los Perfiles Ambientales Humedales Altoandinos por parte de la CONAF, y en 2009 la ya referida Guía Descriptiva de Sistemas Vegetacionales Azonales Hídricos Terrestres (SVAHT) por parte del SAG. El Ministerio del Medio Ambiente (MMA), por su parte, emite la Guía para la Conservación y Seguimiento de Humedales, la cual sintetiza, estandariza y define el marco conceptual para el manejo y seguimiento ambiental de los ecosistemas de humedales. Posterior a aquello, en 2013 se formaliza la creación del Comité Nacional de Humedales (CNH) y en 2018 se publica el primer Plan Nacional de Protección de Humedales 2018-2022, que constituye una iniciativa del Gobierno de Chile que busca contribuir a detener el deterioro de los humedales y preservar su biodiversidad. Por último, en la actualidad se está a la espera de la publicación (previa aprobación y validación) del Plan de Acción para la Conservación de Humedales, en cuya elaboración trabajaron el MMA y el CNH (que cuenta con representantes del sector público, y con la visión de agentes interesados externos al Comité, tanto del ámbito privado como la academia, ONG's, entre otros). Este documento tiene por objetivo trazar lineamientos que apuntan a profundizar el conocimiento e información que se tiene de los humedales, con el objeto de tomar decisiones y realizar una gestión más efectiva para su protección.

Las bases para el desarrollo de políticas apropiadas de protección de humedales son un monitoreo preciso y un análisis razonable de los cambios en humedales. Con el desarrollo de la tecnología de percepción remota, se han desarrollado métodos que permiten un diagnóstico y evaluación de la salud ambiental ecológica (Di L, Chunxiang C, Wei C, Xiliang N. Rong T and Xiaojun X, 2017). Por ejemplo, imágenes multitemporales y multiespectrales se han usado ampliamente para el monitoreo de cambios en humedales porque tienen la ventaja de poder evaluar las variaciones espaciotemporales en la cobertura del suelo de forma rápida y con alta precisión incluso ante desastres como las sequías y las inundaciones. Hay que puntualizar que se han realizado muchos estudios para el monitoreo de cambio de humedales desde la perspectiva de los componentes y las estructuras, pero son pocos los estudios que se han enfocado en la simulación y predicción de las tendencias futuras de los humedales.

Un ejemplo reciente de lo anterior lo constituye un apartado generado en el marco del EIA de Proyecto “Continuidad Operacional Compañía Minera Zaldívar”, correspondiente a un Modelo Ecosistémico y de Cobertura Vegetal (Agroenergía, 2019). En él, se trabaja en el Sistema de humedales de Tilopozo, los cuales se ubican en el extremo sur de la cuenca del Salar de Atacama, en la Región de Antofagasta. Aportes superficiales temporales (a partir de eventos de precipitación intensos) junto con flujos subterráneos constituyen el principal aporte de agua al sistema natural. Esto permite la existencia de vegas y bofedales, las que dependen de la disponibilidad de agua local o de agua subterránea. A partir de los obtenidos desde el análisis multitemporal de la superficie cubierta con vegetación, profundidad del nivel freático y datos de meteorología, se diseñó un modelo numérico que fuese capaz de reproducir el comportamiento de la superficie de vegetación

en función de variables explicativas: nivel freático, precipitación y evapotranspiración. Se trabajó con los valores medios anuales de todos los parámetros (precipitación, evapotranspiración, niveles y áreas cubiertas de vegetación), y se entrenó el modelo con los datos del periodo 2000-2016. Luego, a partir de los distintos escenarios del modelo hidrogeológico de Zaldívar se hicieron estimaciones futuras de áreas de cobertura vegetal, para así estimar potenciales efectos en los humedales, y tener una herramienta que aporte a la gestión del agua subterránea sin comprometer el sistema de humedales de Tilopozo.

Los avances y mejoramientos tanto en la tecnología de las imágenes satelitales, como en la capacidad de procesamiento de estas permiten explorar y profundizar lo que se había desarrollado previamente sobre el tema. En particular para Chile, el estudio seminal sobre la relación de niveles freáticos con la vegetación lo constituye el “Estudio de la Respuesta al Stress Hídrico de las Plantas del Sector Sur del Salar de Atacama”, desarrollado por el Centro de Ecología Aplicada (CEA) para Minera Escondida (MEL) en septiembre de 1996. El objetivo de este estudio era estimar la resistencia de las especies de plantas más abundantes del sector sur del Salar de Atacama a disminuciones del nivel freático, en el caso que las extracciones de agua subterránea desde Monturaqui y Negrillar afectara al nivel en ese sector.

Este estudio obtuvo relevancia tanto medioambiental como regulatoria porque algunos años más tarde el Plan de Alerta Temprana para el Acuífero de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo (PAT MNT) desarrollado por la DGA en julio de 2001, citando el referido estudio del CEA, establece como umbral máximo de disminución de los niveles en el sector de Tilopozo los también referidos 25 cm como condición para el ejercicio de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas constituidos en el sistema acuífero MNT. Así, el descenso máximo de 25 cm para la no afectación de la vegetación (pese a que se trató sólo de 1 estudio, con condiciones particulares y estudiando las plantas de un sector específico) quedó referido en un documento oficial de la autoridad ambiental (en este caso, la DGA). Dado que se trataba de un tema en el que no se había ahondado mayormente, y debido también al hecho de que hubiera una referencia validada por la autoridad, el umbral de 25 cm fue usado y citado en diversos análisis y estudios que trataran sobre la relación del nivel freático con el estado y salud de la vegetación que aquel sostiene.

Por otro lado, las características y procedimientos asociados a los estudios de medición de vegetación hacen muy difícil y económicamente costosa la realización de campañas de terreno a nivel mensual. Esto implica que datos de vegetación tomados de manera empírica sólo pueden tenerse contadas veces al año (usualmente, 1 medición por estación). La importancia de poder contar con más información y de carácter más continuo necesariamente implica complementar la necesaria información recabada en terreno con otra que tenga una mayor extensión temporal, que permita un análisis de tendencias en las áreas de cobertura de vegetación.

Para lo mencionado anteriormente, las imágenes satelitales de la serie Landsat constituyen una gran fuente de información. Esto, dado que la percepción remota es la mayor fuente de información espacial sobre la cobertura y constitución de la superficie terrestre (Guo, 2017). Además, el Gobierno de Estados Unidos, a través del Servicio Geológico de ese país (USGS) ha mantenido

durante largo tiempo en funcionamiento la misión Landsat, siendo la primera lanzada en 1972 y la última (Landsat 9) recientemente, en septiembre de 2021. Así, la gran extensión temporal de registros permite generar series de tiempo para análisis de tendencias como el señalado anteriormente.

Las mediciones de nivel y meteorología, por su parte, en general se realizan de manera habitual y constante en el tiempo (siendo en la actualidad la tendencia el instrumentalizar los pozos de manera de tener registros continuos, siendo habitual la medición a nivel mensual de niveles dados los requerimientos y obligaciones derivados de la aprobación ambiental de los proyectos. Esto, sumado a la mencionada dificultad de realizar en la misma escala temporal (mensual) campañas de medición de vegetación y a la información que se puede obtener a partir de imágenes satelitales de acceso abierto, el objetivo del presente trabajo es generar una metodología que permita unir la información de recursos hídricos (medida regularmente, y que muchas veces cuenta con registros que abarcan extensos periodos temporales) con la de vegetación estimada a partir de imágenes satelitales. Esto también en el marco de que servicios públicos como el SEA han estado trabajando en el monitoreo telemático del estado de humedales, por ejemplo (dentro de varias otras iniciativas que involucran el trabajo con información de imágenes satelitales como parte del trabajo de fiscalización).

El interés en el desarrollo de una metodología que pueda unir la información de niveles freáticos y meteorología con las áreas de cobertura vegetal con el objeto comprender las tendencias más largas que han tenido las áreas de vegetación y de estimar estas últimas a futuro se asocia a poder tener un mejor entendimiento de la dinámica del sistema, y de esta forma proyectar sobre bases más sólidas los potenciales escenarios futuros, para así poder tomar medidas y tener una mejor gestión tanto del recurso hídrico como de protección de la vegetación.

Este tema, con diferentes variaciones, desde diferentes ángulos y de diferentes formas, ha empezado a generar mayor atención y estudios asociados. Así, por ejemplo, se tiene el trabajo de Paneque et al (Corvalán S, J., Román F, C. y Paneque C, M., 2019), y también análisis exploratorios, aunque todavía de carácter interno, de parte de algunas empresas ubicadas en las cercanías de estos SVAHT. Lo anterior, con el interés de contar con un mejor entendimiento de estos sistemas y poder gestionar mejor el uso de agua para su protección. Esto, a su vez, dado un alto interés mostrado por la autoridad ambiental con el objeto de cuidar y preservar estos frágiles sistemas, lo que puede implicar mayores restricciones para el uso de aguas subterráneas en sectores aledaños a formaciones tipo SVAHT.

## **2.2 TÉCNICAS DE ANÁLISIS ESPACIAL E INDICADORES**

### **2.2.1 Imágenes Landsat**

El satélite Landsat fue el primero enviado por Estados Unidos para el monitoreo de los recursos terrestres. En un comienzo se le denominó ETRS (*Earth Resources Technology Satellite*),

posteriormente los restantes recibieron el nombre de Landsat. El lanzamiento de Landsat 1 fue en 1972.

Los satélites llevaron a bordo diferentes instrumentos con la finalidad de captar más información de la superficie terrestre, con mayor precisión y detalle, lo que con el tiempo ha llevado a constantes mejoras radiométricas, geométricas y espaciales.

El programa Landsat es un esfuerzo conjunto llevado a cabo por la NASA y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), y en la actualidad se encuentran en funcionamiento las misiones Landsat 7 (desde abril de 1999) y Landsat 8 (desde febrero de 2013). El satélite Landsat 9 fue lanzado en septiembre de 2021, y desde febrero de 2022 se encuentran disponibles sus imágenes para descarga. Por otro lado, la misión Landsat 5 fue la más extensa en su funcionamiento, manteniéndose durante poco más de 29 años (desde marzo de 1984 a junio de 2013) en órbita y entregando imágenes de alta calidad a nivel global.

Cabe resaltar que las características técnicas tanto de resolución espacial como espectral varían en los satélites correspondientes a cada misión Landsat. A continuación, en la Tabla 2-1, Tabla 2-2 y Tabla 2-3 se resumen las características de los satélites Landsat 5, 7 y 8, respectivamente. En ellas puede verse cómo se van haciendo más precisas y detalladas las bandas, abarcando un espectro cada vez mayor. El mayor salto se da entre Landsat 7 y 8.

**Tabla 2-1: Características Técnicas Landsat 5**

<b>Banda</b>	<b>Longitud de onda (micrómetros)</b>	<b>Resolución (metros)</b>
Banda 1 – Azul	0.45 - 0.52	30
Banda 2 – Verde	0.52 - 0.60	30
Banda 3 – Rojo	0.63 - 0.69	30
Banda 4 – Infrarrojo Cercano (NIR)	0.76 - 0.90	30
Banda 5 – Infrarrojo de Onda Corta (SWIR) 1	1.55 - 1.75	30
Banda 6 – Térmica <sup>(1)</sup>	10.40 - 12.50	120*(30)
Banda 7 – Infrarrojo de Onda Corta (SWIR) 2	2.08 - 2.35	30

(1): La banda 6 se adquiere con una resolución de 120 m, pero los productos se resamplan a píxeles de 30 m

*Fuente:* Elaboración propia a partir de información del USGS.

**Tabla 2-2: Características Técnicas Landsat 7**

<b>Banda</b>	<b>Longitud de onda (micrómetros)</b>	<b>Resolución (metros)</b>
Banda 1 – Azul	0.45 - 0.52	30
Banda 2 – Verde	0.52 - 0.60	30
Banda 3 – Rojo	0.63 - 0.69	30
Banda 4 – Infrarrojo Cercano (NIR)	0.77 - 0.90	30
Banda 5 – Infrarrojo de Onda Corta (SWIR) 1	1.55 - 1.75	30
Banda 6 – Térmica <sup>(1)</sup>	10.40 - 12.50	60*(30)
Banda 7 – Infrarrojo de Onda Corta (SWIR) 2	2.09 - 2.35	30
Banda 8 – Pancromática	0.52 - 0.90	15

(1): La banda 6 se adquiere con una resolución de 60 m, pero los productos se resamplan a píxeles de 30 m

*Fuente:* Elaboración propia a partir de información del USGS.

**Tabla 2-3: Características Técnicas Landsat 8**

<b>Banda</b>	<b>Longitud de onda (micrómetros)</b>	<b>Resolución (metros)</b>
Banda 1 – Aerosol Costero	0.43 - 0.45	30
Banda 2 – Azul	0.45 - 0.51	30
Banda 3 – Verde	0.53 - 0.59	30
Banda 4 – Rojo	0.64 - 0.67	30
Banda 5 – Infrarrojo Cercano (NIR)	0.85 - 0.88	30
Banda 6 – Infrarrojo de Onda Corta (SWIR) 1	1.57 - 1.65	30
Banda 7 – Infrarrojo de Onda Corta (SWIR) 2	2.11 - 2.29	30
Banda 8 – Pancromático	0.50 - 0.68	15
Banda 9 – Nubes	1.36 - 1.38	30
Banda 10 – Infrarrojo Térmico (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100
Banda 11 – Infrarrojo Térmico (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100

*Fuente:* Elaboración propia a partir de información del USGS.



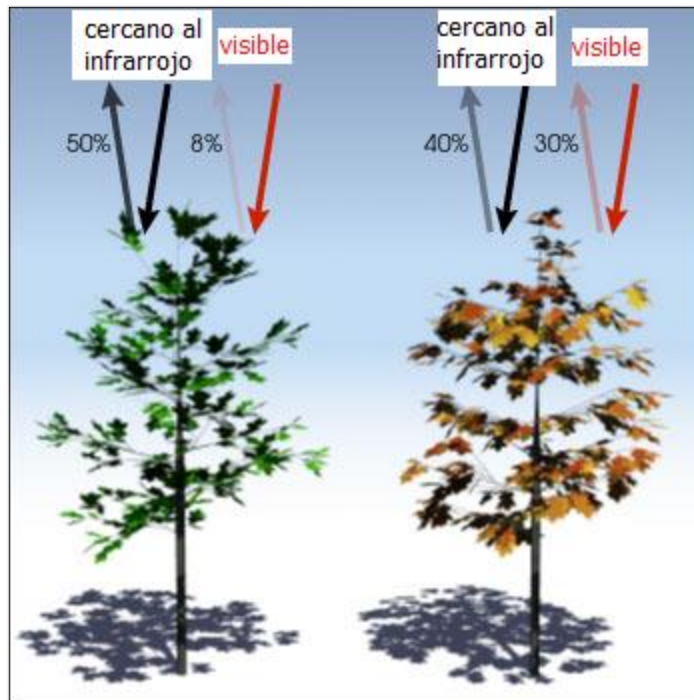
Por último, es importante señalar que las imágenes Landsat 7 presentan problemas de pérdidas parciales de información desde mayo de 2003, cuando el *Scan Line Corrector* (SLC), el cual compensa el movimiento hacia adelante del satélite, falló. Hubo varios intentos por corregir esta situación, pero fueron infructuosos, razón por la cual la falla se mantuvo de forma permanente (USGS, 2020).

### 2.2.2 Índice NDVI

Para determinar la densidad del verdor en un parche de tierra, se deben observar los distintos colores (longitudes de onda) de la luz solar visible y cercana al infrarrojo reflejada por las plantas. Cuando la luz solar incide sobre algún objeto, ciertos largos de onda del espectro de la luz solar son absorbidos, en tanto que otros son reflejados. La clorofila, que es el pigmento que hay en las hojas de las plantas, absorbe fuertemente la luz visible (0,4 a 0,7  $\mu\text{m}$ ) para su uso en la fotosíntesis. Por otro lado, la estructura de las hojas refleja fuertemente la luz cercana al infrarrojo (0,7 a 1,1  $\mu\text{m}$ ). Así, mientras más hojas tenga una planta, más afectados se ven estos largos de onda (NASA, 2000).

En general, si hay mayor cantidad de radiación reflejada en largos de onda cercanos al infrarrojo que en los visibles, entonces la vegetación en ese píxel es más probable que sea densa y/o más vigorosa. Por el contrario, si hay muy poca diferencia en la intensidad de las longitudes de onda visibles y cercanas al infrarrojo reflejadas entonces es probable que la vegetación sea escasa y/o con poco vigor. Un ejemplo de lo anterior puede observarse en la Figura 2-4. La vegetación sana (izquierda) absorbe la mayor parte de la luz visible y refleja una proporción importante de la luz cercana al infrarrojo. Por otro lado, la vegetación poco sana o escasa (derecha) refleja más luz visible y menos cercana al infrarrojo.

**Figura 2-4: Reflexión largos de onda visible y cercano al infrarrojo en vegetación sana (izquierda) y poco sana o escasa (derecha).**



*Fuente: NASA (2000).*

En base a la diferencia antes señalada se elaboró el Índice de Vegetación Diferencial Normalizado o NDVI, el cual es el más usado y difundido de los índices de este tipo. El NDVI ayuda a diferenciar la vegetación de otros tipos de cobertura del suelo y determinar su estado general. También permite definir y visualizar áreas con vegetación en un mapa. Su formulación matemática es la siguiente:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

donde NIR corresponde a la banda espectral cercana al infrarrojo, en tanto que Red corresponde a la banda espectral de la luz visible. El cálculo del NDVI para un píxel varía siempre entre -1 y 1.

### **2.2.3 Tipos de Modelo y Definición de Uso**

La primera definición que se tomó para la elaboración del modelo predictivo fue la de qué tipo de regresión múltiple se utilizaría para el trabajo a desarrollar. Para esto, se tenían como opción diversos tipos de regresión, pero la que mejores resultados entregó fue la Regresión Lineal Múltiple (MLR por sus siglas en inglés). A continuación, se detallan los tipos de regresión que se tuvo en consideración:

- ***Multiple Linear Regression (MLR)***: La regresión lineal múltiple (MLR, por sus siglas en inglés) es la situación más general (y común) de regresión lineal (Wilks, 2011). Hay un solo predictando,  $y$ , mientras que hay más de una variable predictora  $x$ . En esencia, lo que se

busca es resumir la relación que hay que entre los múltiples predictores ( $x_1, x_2, \dots, x_k$ ) y el predictando  $y$ .

Si  $K$  es el número de predictores, la ecuación de predicción corresponde a

$$\hat{y} = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + \dots + b_K \cdot x_K$$

$b_0$  corresponde al intercepto o constante de la regresión, en tanto que los  $K + 1$  coeficientes de la regresión se denominan comúnmente parámetros de la regresión.

En la regresión lineal simple se busca ajustar la relación con el único predictando a través de una sola línea recta, buscando la línea que minimice los errores entre las predicciones de  $y$  con respecto a las observaciones de  $x$ . En cambio, para el caso de la regresión lineal múltiple (en el caso de 2 predictandos), lo que se obtiene es más bien un plano que una recta, y el error que se busca minimizar es la distancia perpendicular en línea recta a tal plano. La situación es análoga para el caso de 3 o más variables, pero no es fácilmente visualizable (Wilks, 2011). Para resolver el problema y encontrar los parámetros, se minimiza la suma de los errores cuadráticos.

- **Transformaciones:** Las regresiones múltiples abren la posibilidad de una cantidad casi ilimitada de potenciales variables predictoras (Wilks, 2011). Así, a una lista inicial de potenciales predictores se pueden agregar varias opciones al considerar transformaciones matemáticas no lineales de estas variables como potenciales predictores también. Los predictores derivados deben ser funciones no lineales de los predictores primarios en orden a que los cálculos sean posibles. Estos predictores derivados pueden ser de gran ayuda para producir una buena ecuación de regresión (Wilks, 2011). En algunos casos, la forma más apropiada para la transformación de predictores puede ser sugerida por una comprensión física del proceso de generación de datos. Si no hay un raciocinio físico sólido para transformaciones particulares de los predictores, estas podrían ser puramente empíricas, evaluando, por ejemplo, la forma general de la nube de puntos, o por la naturaleza de la desviación en un gráfico de errores con respecto a su forma ideal.
- **Local Regression:** Corresponde a otro enfoque para ajustar funciones no lineales flexibles, que implica ajustar en un punto objetivo  $x_0$  usando sólo las observaciones cercanas a ese punto (James, G.; Witten, D.; Hastie, T; Tibshirani, R., 2013). En simple, funciona determinando la fracción de puntos cuyos valores de  $x$  sean cercanos a  $x_0$ , y a este subgrupo ajustar la curva que mejor los represente, en un proceso secuencial para abarcar todas las observaciones. Lo más relevante de este método es la definición del rango a usar: mientras más pequeño el rango, más local y sinuoso será el ajuste; por otro lado, un rango muy amplio llevará a un ajuste global de los datos usando todas las observaciones (James, G.; Witten, D.; Hastie, T; Tibshirani, R., 2013).
- **Shrinkage:** Otro tipo de modelos requiere seleccionar, a priori, un subset de predictores a partir de los cuales realizar el ajuste. Una alternativa consiste en ajustar un modelo que contenga todos los predictores usando una técnica que limita o restringe los coeficientes estimados, o equivalentemente, contrae (*shrink* en inglés) el coeficiente estimado a cero. Podría no ser obvio por qué esta restricción mejoraría el ajuste, pero resulta que encoger

los coeficientes estimados puede reducir significativamente la varianza (James, G.; Witten, D.; Hastie, T; Tibshirani, R., 2013). Las dos técnicas más conocidas para la contracción de los coeficientes tendiendo a cero son la regresión tipo Ridge y la Lasso.

Por último, cabe señalar que se buscó encontrar buenos ajuste con las Transformaciones (no había ninguna función que, al transformar los datos, ayudara a tener un mejor ajuste de aquellos), *Local Regression* (no se trata de datos que se comporten de maneras distintas y distinguibles a lo largo del periodo de análisis) y, en particular, con la regresión tipo *Shrinkage*. Pese a lo anterior, los resultados no fueron satisfactorios en relación con lo obtenido con la regresión tipo MLR, ya que no disminuía ni la varianza ni el error, por ejemplo. Dado lo anterior, se decidió utilizar la regresión MLR para el presente trabajo.

### **2.3 MODELO HIDROGEOLÓGICO DE COLLAHUASI**

En el marco del EIA “Desarrollo de Infraestructura y Mejoramiento de Capacidad Productiva de Collahuasi” (Arcadis, 2018), se elaboró el modelo hidrogeológico para las cuencas de Coposa, Michincha (que es la de interés para el presente trabajo) y subcuencas Vertiente Pacífico.

El objetivo principal del modelo hidrogeológico integrado es servir de herramienta para la evaluación de impactos sobre la cantidad y calidad de recursos hídricos superficiales y subterráneos, que serían potencialmente modificados por el Proyecto, y luego de su término.

La modelación desarrollada abarca las cuencas de Coposa, Michincha y las subcuencas ubicadas en torno al rajo Rosario. Se elabora un modelo integrado para garantizar una correcta interacción entre las cuencas de Coposa y Michincha, y entre el sector de Rosario y la cuenca de Michincha, considerando que el rajo se ubica cerca del límite de Michincha. Existe continuidad hidráulica, geológica e hidrogeológica entre los tres acuíferos principales, por lo que lo que ocurra en una cuenca puede afectar a otra. Como ejemplo, se puede mencionar que la acción del desaguado en Rosario puede afectar el acuífero y las vegas ubicadas en Michincha.

Los resultados relevantes para el presente trabajo correspondieron a los niveles proyectados en pozos específicos, los cuales serán utilizados en el modelo para estimar, a su vez, las áreas de vegetación futuras, y analizar tales resultados.

### 3 METODOLOGÍA DE TRABAJO PROPUESTA

Tomando en consideración lo referido anteriormente, en el presente capítulo se detalla la metodología que se propone para establecer la relación entre nivel freático, variables climáticas y áreas de cobertura vegetal.

Primero que todo, se ordena y sistematiza la información de niveles y meteorología en una única Base de Datos, la cual se utilizará para recoger toda la información necesaria para el trabajo a realizar.

Luego, se realiza la búsqueda y procesamiento de imágenes satelitales correspondientes al salar de Michincha. Se buscan imágenes mes a mes desde marzo de 1985 a diciembre de 2020, las cuales se procesan en la plataforma Google Earth Engine, donde se acota el área específicamente al salar de Michincha, y se calcula el índice NDVI. Esta plataforma permite usar la infraestructura de la nube de Google para trabajar, mediante algoritmos generados por el usuario, un catálogo extenso de imágenes satelitales y sets de datos geoespaciales.

El valor umbral de NDVI que se usó fue 0,13, valor que es respaldado por investigaciones llevadas a cabo en otras áreas hiper-áridas de Chile (Corvalán S, J., Román F, C. y Paneque C, M.,2019). A modo de referencia, se comparó este valor con los usados en una investigación reciente (De La Fuente, Meruane y Suárez, 2021). Aunque ahí se determina un valor umbral para cada sistema estudiado por separado, y diferenciando también para imágenes Landsat 5 y 8, los valores son similares al usado para el presente trabajo. Así, por ejemplo, para el sistema más cercano a Michincha estudiado (Salar del Huasco), los umbrales determinados fueron 0,05 para L5 y 0,15 para L8. Así, se estima que 0,13 es un valor adecuado para el umbral que marca la presencia o no de vegetación. Luego, a partir de los píxeles en que, siguiendo el criterio anterior, se detecta vegetación, se realiza el procesamiento de las imágenes con el software de código libre Quantum Gis (QGis), de manera de contabilizar los píxeles que detectan vegetación y multiplicarlos por el tamaño del píxel (30x30 m en Landsat, 900 m<sup>2</sup>) y así generar las áreas de cobertura de vegetación.

En relación con lo anterior, las imágenes se seleccionaron de manera mensual, e imponiendo un criterio de nubosidad menor al 30%. Se trabajó con la colección *USGS Landsat 5 TM Collection 1 Tier 1 Raw Scenes* para las imágenes Landsat 5, y con *USGS Landsat 8 Collection 1 Tier 1 and Real-Time data Raw Scenes* para las imágenes Landsat 8. Según información del USGS, se trata de productos con el brillo del sensor calibrado y escalado, que son imágenes con la calidad de datos más alta y se consideran adecuadas para el análisis de procesamiento de series temporales. El Nivel 1 (*Tier 1*) incluye el proceso de datos de terreno de precisión que tienen una radiometría bien caracterizada y están intercalibrados en los diferentes sensores Landsat (USGS, 2022).

La información generada a partir del cálculo del índice NDVI también se sistematiza y se ordena en la Base de Datos antes referida, de manera de consolidar en un solo lugar toda la información que se usará en el trabajo a desarrollar. También se hace un chequeo de los resultados

contrastándolos con los resultados de transectos realizados en el marco del EIA de Collahuasi (Arcadis, 2018).

Después, se busca, ordena y sistematiza en la Base de Datos la información meteorológica que se usará. En este caso, la información recogida corresponde a precipitación y evaporación.

Con toda la información agrupada y ordenada en la Base de Datos, se procede a definir qué pozos se usarán para la estimación de las áreas, así como también qué elementos de la meteorología se usarán también.

Posteriormente, la información de niveles a usar, las variables climáticas (precipitación en este caso) y las áreas de cobertura vegetal estimadas deben ordenarse de forma tal de buscar los meses para los que se cuente con información de todos los elementos. Así, se debe contar con dato de nivel freático (profundidad) para todos los pozos que se usarán, de precipitación y de área estimada de vegetación para poder utilizar un mes en particular. Dado lo anterior, es en este punto donde se define la información a usar específicamente en la determinación de la relación para la estimación de las áreas de cobertura de vegetación. Esto, dado que puede haber meses en los que, por distintas razones, no haya medición de nivel, información de precipitación, o que no haya disponibles imágenes satelitales (o si hay, que no sean utilizables por la cobertura de nubes o de nieve en el área de estudio, por ejemplo).

Una vez definida toda la información que se usará para obtener una relación entre niveles, precipitación y áreas de vegetación estimadas, se trabaja en el software R la regresión multi lineal para la obtención de los coeficientes que acompañan a cada uno de los estimadores a utilizar.

A partir del análisis de los resultados del proceso anterior, se identifica un número importante de imágenes satelitales del periodo invernal que, dada la cobertura nival que muestran esos meses, distorsionan los resultados y alteran la relación que se busca obtener. Por lo anterior, se decide utilizar solamente imágenes correspondientes al verano, o la más cercana que haya a esos meses. Se ordena el resto de la información con el objeto de utilizar la correspondiente al periodo estival, y se recalculan en R los coeficientes que acompañan a cada estimador.

Por último, con la información de niveles futuros simulados que se obtiene a partir de la modelación hidrogeológica (Modelo Hidrogeológico de Collahuasi, Arcadis, 2018) en los pozos en cuestión, más estimaciones futuras de la precipitación, se utiliza la relación antes obtenida para estimar áreas futuras de cobertura de vegetación.

## 4 ÁREA DE ESTUDIO

En el presente capítulo se describe el área de estudio enfocada a la escala del Salar de Michincha, que corresponde a un área pequeña dentro de la cuenca de Michincha. Dado lo anterior, se debe tener presente que el marco general del área de estudio específica es esta última, por lo que los detalles a escala de cuenca se encuentran en el Anexo A (Geología, Hidrología, Hidrogeología, Calidad de Aguas, entre otros).

### 4.1 ANTECEDENTES SALAR DE MICHINCHA

El Salar de Michincha se ubica dentro de la cuenca de Michincha, la cual se localiza a su vez en la Región de Tarapacá, a unos 185 km al sureste de Iquique. Lo anterior se muestra en la Figura 4-1, en la cual se demarca en rojo la cuenca de Michincha. La cuenca corresponde a una cuenca altiplánica, cuyo límite este se encuentra en la Cordillera de los Andes, donde se ubica la frontera con Bolivia. Luego, en la Figura 4-2 se presenta el detalle de los hitos geográficos más relevantes de la cuenca de Michincha para el presente trabajo.

**Figura 4-1: Ubicación General Salar de Michincha**



*Fuente: Elaboración Propia.*

**Figura 4-2: Detalle Hitos Geográficos Salar de Michincha**



*Fuente: Elaboración Propia.*

#### **4.1.1 Hitos Operacionales Collahuasi y Quebrada Blanca**

Como ya ha sido mencionado anteriormente, el área de estudio se encuentra afectada por la intervención antrópica propia de las actividades mineras. Así, tanto las infiltraciones del depósito de relaves de Pampa Pabellón, así como las extracciones de aguas subterráneas en la cuenca de Michincha y en el rajo Ujina han modificado el flujo de agua subterránea observado en régimen natural.

En el año 1993 se inició la extracción de recursos subterráneos en la cuenca de Michincha por parte de Quebrada Blanca (mediante el pozo P-7/P-7B), mientras que Collahuasi inicia las extracciones en el último trimestre de 2004 para abastecimiento de agua a la operación y luego en 2005 con el objetivo de recuperar las aguas infiltradas desde el Depósito de Relaves Pampa Pabellón, tanto hacia el sur como hacia el noreste de aquel.

Al sur del salar se ubica la vertiente Michincha, un punto donde afloraba agua que luego escurría superficialmente y de manera dispersa, alimentando la vegetación en la zona. Según se señala en el EIA de Collahuasi de 2018 (Arcadis, 2018), desde antes que comenzaran las extracciones de Collahuasi en el acuífero de Michincha (último trimestre de 2004) la vertiente se encontraba seca. Esto constituye el único registro disponible con respecto a este tema. La vertiente se secó en algún momento de 2003, y este hecho se constata en enero de 2004 por parte de las autoridades. En el EIA del proyecto “Expansión 110 ktpd, Planta Concentradora Collahuasi” indican un valor de descarga estimado en 6 l/s (entre 5 y 7 l/s) en la vertiente para el periodo comprendido entre febrero de 1980 y marzo de 1981 (Errol Montgomery, 1996). Desde mayo de 2005, Collahuasi realiza una mitigación por un caudal de 5 l/s en este sector provenientes del pozo P-6, ubicado al sureste de la vertiente, con calidad similar a la registrada históricamente en la vertiente (Res. Ex. N°167/2001).



Luego, entre agosto y octubre de 2009 hay una etapa de reducción del desaguado del rajo Ujina, y en 2011 entra en funcionamiento otro pozo de producción de Quebrada Blanca (pozo P-3/M-5). Posterior a aquello, hay una disminución progresiva de las extracciones en el pozo P-7/P-7B por parte de QB, la que llega a 0 en algunos meses de 2014. A partir de la RCA N°72/2016 (que califica ambientalmente el proyecto “Actualización Proyecto Minero Quebrada Blanca”), uno de los compromisos asumidos fue reducir las extracciones en Michincha, lo que quedó plasmado en la medida de mitigación “Reducción Volumen de Extracción en Acuífero Michincha”, con su correspondiente Plan de Seguimiento, por lo que la tendencia a la reducción de caudales de extracción se mantiene desde 2016 en adelante (ver Figura 4-8).

## **4.1.2 Hidrogeología**

### ***4.1.2.1 Piezometría Cuenca de Michincha***

En el presente acápite se presentará la información de piezometría a nivel del salar de Michincha, dejando la información más detallada a nivel de cuenca en el Anexo A.

Las cotas piezométricas más altas observadas en la cuenca de Michincha se ubican en la zona más hacia la cordillera, en el este, donde ocurre la mayor parte de la recarga por precipitaciones, fluyendo hacia el centro de la cuenca. Por otro lado, las cotas piezométricas más bajas se ubican en el depocentro (salar) de la cuenca.

El flujo subterráneo presenta un flujo hacia el depocentro, donde se observa poca variabilidad de los niveles, los que fluctúan entre 4.110 y 4.115 msnm. El flujo escurre de manera predominante hacia el norte, descargando hacia la contigua cuenca de Coposa, con un gradiente del orden de 5-6%, y también existe una descarga subterránea hacia el sur (cuenca del río Loa) a través de la ignimbrita Ujina con un gradiente del orden de 2%.

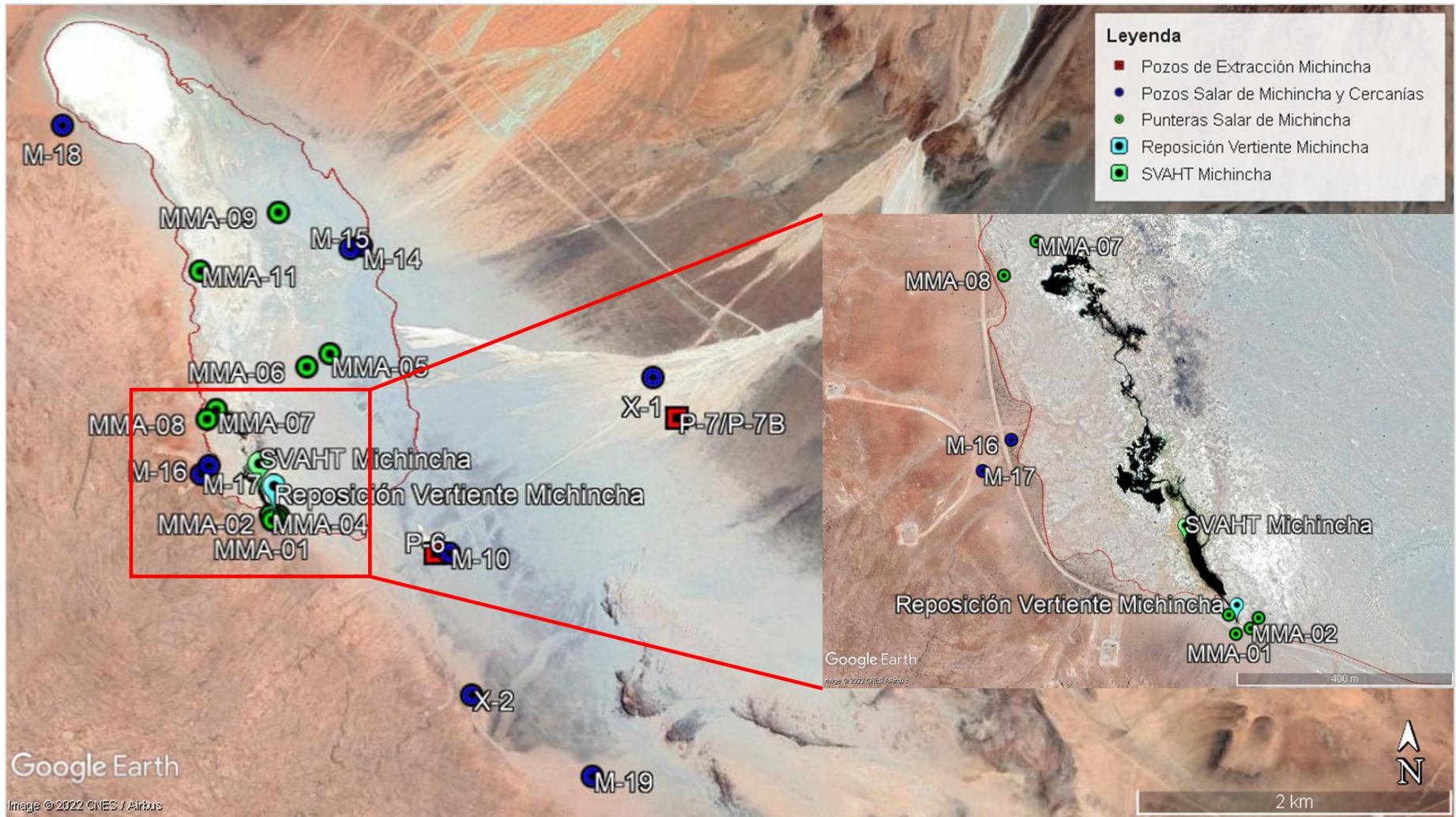
La cuenca de Michincha como cuenca hidrológica cerrada superficialmente (ya que, como se vio, tiene salidas subterráneas hacia cuencas aledañas) genera zonas de acumulación de agua en las zonas más bajas e induce niveles de agua subterránea someros, lo que, sumado a las altas tasas de evaporación, origina zonas de vegas, lagunas de evaporación y salares que se encuentran conectados con el acuífero.

### ***4.1.2.2 Comportamiento Histórico de Niveles***

En el presente acápite se realiza un análisis del comportamiento temporal de los niveles de agua subterránea en la cuenca de Michincha y los hechos que lo han marcado, haciendo hincapié en el salar de Michincha y la zona al sureste de aquél, que es una zona importante para el desarrollo del presente Trabajo, ya que los niveles de esas zonas son los que alimentan a la vegetación que se ubica en su mayor parte al sur del salar. En la Figura 4-3 se presenta la ubicación general de todos los pozos de interés en el Salar de Michincha y al Sureste de él, mientras en la Tabla 4-1 se resumen las características de los distintos pozos.

Es importante mencionar que, a partir del segundo semestre de 2019, la manera en que se reportan los niveles en la zona por parte de Collahuasi cambia y deja de reportar algunos pozos, entre ellos, MMA-06, MMA-08, MMA-11, M-15 y X-2. Es por esta razón que la información de niveles en esos pozos sólo puede actualizarse hasta ese periodo.

**Figura 4-3: Ubicación Pozos Salar de Michincha y Sector Sureste**



*Fuente: Elaboración Propia.*

**Tabla 4-1: Resumen Información Pozos Salar de Michincha y Sector Sureste**

Pozo	Coordenadas Datum WGS84		Tipo	Profundidad (m)	Cribas inicio (m)	Cribas fin (m)	Cota con Stick Up (msnm)
	E (m)	N (m)					
M-10	547.861	7.677.832	Pozo	89,9	28	89,9	4.135,6
M-14	547.293	7.679.835	Pozo	140	48,8	140,2	4.132,1
M-15	547.218	7.679.816	Pozo	45,7	22,9	35,1	4.129,1
M-16	546.284	7.678.406	Pozo	6,7	0	6,7	4.122,7
M-17	546.231	7.678.349	Pozo	121,9	6,1	121,9	4.124,3
M-18	545.329	7.680.627	Pozo	182,9	3,7	182,9	4.121,5
M-19	548.797	7.676.388	Pozo	182,9	29,6	182,9	4.135,5
MMA-01	546.698	7.678.049	Pozo	24	15	18	4.124,6
MMA-02	546.725	7.678.059	Pozo	10	4	10	4.124,4
MMA-03	546.740	7.678.078	Pozo	36	30	36	4.124,4
MMA-05	547.079	7.679.133	Puntera	4,7	-	-	4.122,9
MMA-06	546.926	7.679.048	Puntera	3,1	-	-	4.121,0
MMA-07	546.331	7.678.771	Puntera	3,1	-	-	4.122,0
MMA-08	546.271	7.678.708	Puntera	4,2	-	-	4.122,4
MMA-09	546.747	7.680.054	Puntera	4,4	-	-	4.125,0
MMA-11	546.226	7.679.675	Puntera	3,1	-	-	4.121,3
P-6	547.768	7.677.831	Pozo de Mitigación	184	13,1	69,5	4.134,5
P-7	549.356	7.678.708	Pozo de Producción	303,3	120,4	240,8	4.204,8
X-1	549.201	7.678.970	Pozo	161	122	160	4.202,7
X-2	548.013	7.676.917	Pozo	87	69	81	4.136,5

*Fuente: Elaboración Propia.*

En la Figura 4-4 se presenta la evolución de niveles para los pozos M-17, MMA-06, MMA-08, MMA-11 y M-15, los cuales se ubican en la zona del salar de Michincha (ver Figura 4-3). Se agrega además la precipitación en la estación Ujina (ver acápite 4.1.2.3). El pozo M-17 (el cual está ranurado principalmente en la Ignimbrita Ujina) y los pozos MMA-06 y MMA-08 (cribado en los depósitos evaporíticos), ubicados al oeste del salar de Michincha, muestran un comportamiento similar en los niveles medidos. En la referida figura puede observarse que, desde inicios del periodo de monitoreo, hay un descenso paulatino de los niveles que se mantiene hasta 2012, punto en que los niveles se estabilizan para luego mostrar una reversión de la tendencia al descenso. La tendencia al ascenso de los niveles se mantiene hasta los últimos datos disponibles. En este sector también se observa una respuesta directa a eventos de precipitación en los niveles registrados en los referidos pozos. Este efecto es más bien de corto plazo, ya que algunos meses después del aumento de niveles producto de la precipitación, los niveles retoman su comportamiento más de largo plazo.

Los pozos M-15 (ranurado en el relleno sedimentario) y MMA-11 (habilitado en los depósitos evaporíticos), ubicados al este del salar de Michincha, muestran un comportamiento similar al descrito para el grupo anterior, pero no presentan las oscilaciones típicamente observadas en pozos

influidos por precipitaciones por lo que la napa en este sector no muestra relación con los eventos de precipitación.

En estos pozos se tiene un descenso de los niveles de entre 4 y 5 m hasta 2012, y desde ese año se constata una recuperación de aproximadamente 3 m hasta los últimos registros disponibles. La tendencia no muestra signos de modificación, a lo menos hasta los últimos niveles medidos.

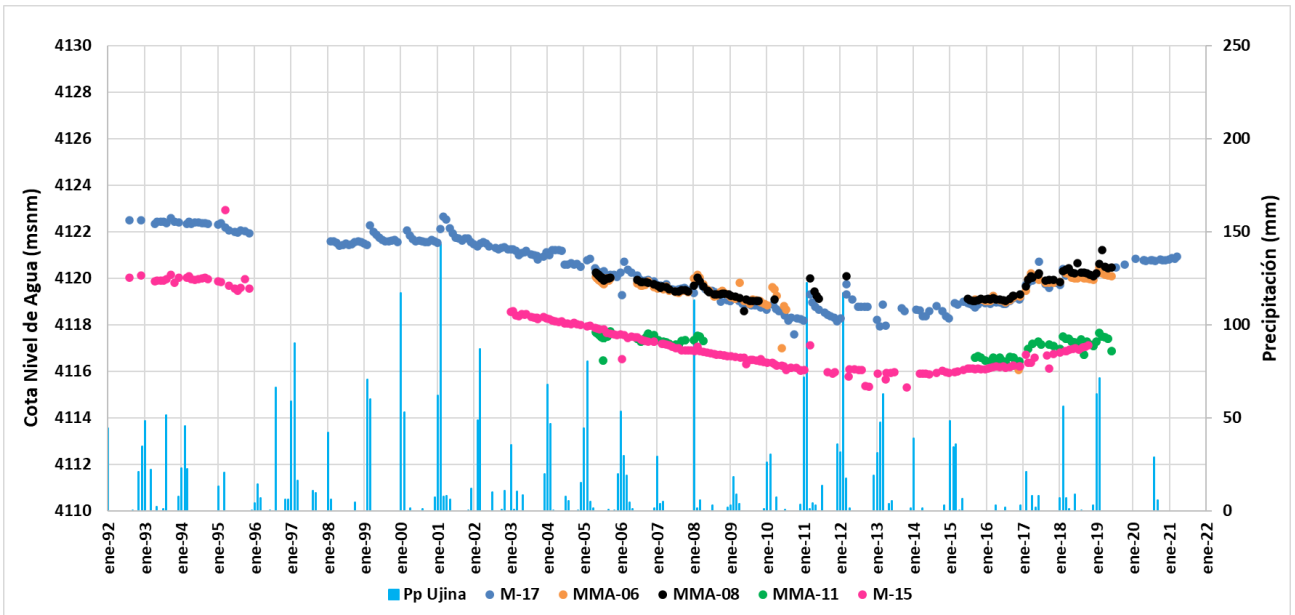
Por otro lado, en la Figura 4-5 se presenta la evolución de los niveles en los pozos M-19, X-2, M-10 y MMA-01, los cuales se ubican al sureste del salar de Michincha (ver Figura 4-3) y están ranurados en la Ignimbrita Ujina. En este caso, también se agrega la precipitación en la estación Ujina.

En este grupo de pozos se observa una evolución conjunta de los niveles, influenciados probablemente por el bombeo del pozo P-7B de Quebrada Blanca. Se observa que desde el inicio de los bombeos en 1992 hasta 1998 (año en que entra en funcionamiento el depósito de relaves) hay un descenso de los niveles. Luego, en los pozos M-10 y M-19 se observa un ascenso de los niveles en 1998 y 2001, lo que podría estar relacionado a recargas mayores debido a las precipitaciones estivales (no se tiene un descenso importante en el bombeo del pozo P-7B en ese periodo, tal como puede verse en la Figura 4-8, por lo que se descarta esa razón como potencial explicación para estos ascensos). Luego de eso, se tiene un claro descenso de los niveles hasta 2012.

Los descensos observados en este grupo de pozos llegan a 5 - 6 m en 2012, en tanto que las recuperaciones desde ese año hasta la última data disponible llegan a 3 - 4 m. Los últimos niveles medidos corresponden a los máximos después de 2012, y la tendencia al alza no muestra signos de variación todavía.

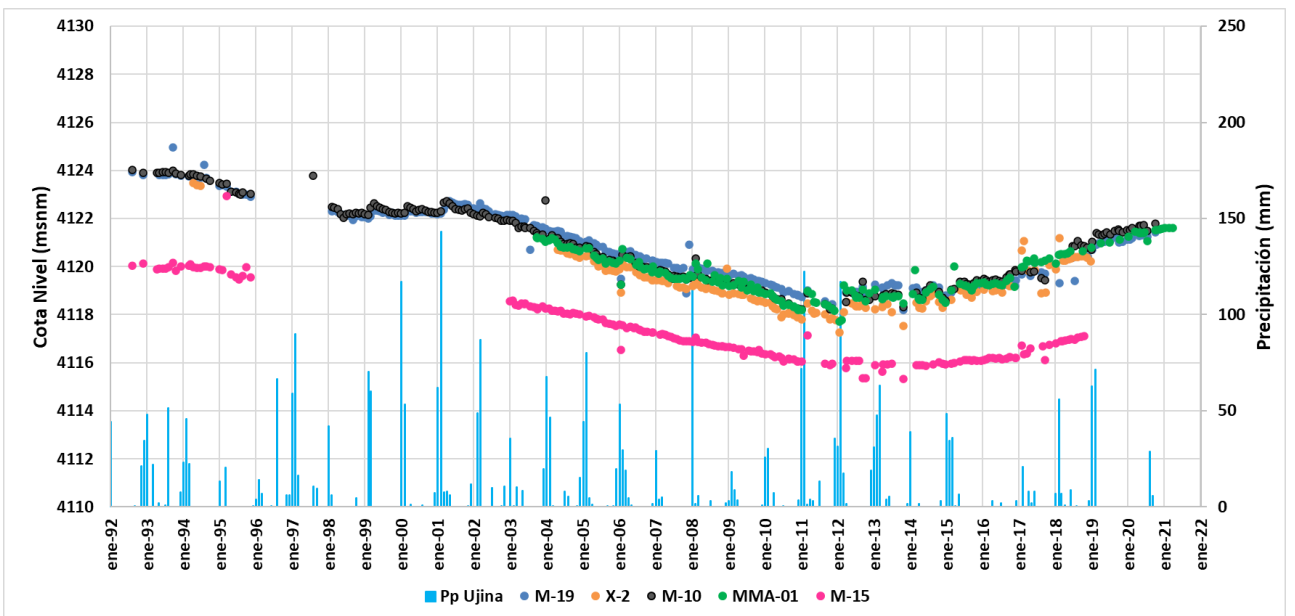
Tal como se observa en los niveles de los distintos pozos en esta zona, se tiene que, en términos generales, muestran tendencias similares, con las extracciones en el pozo P-7B y las precipitaciones siendo los parámetros que afectan de manera más clara y directa en cómo estos se comportan, tanto en los pozos al oeste como al sureste del Salar de Michincha.

**Figura 4-4: Evolución Temporal de Niveles en Pozos M-17, MMA-06, MMA-08, MMA-11 y M-15, y Precipitación Media Mensual Estación Ujina**



*Fuente: Modificado a partir de Arcadis, 2018.*

**Figura 4-5: Evolución Temporal de Niveles en Pozos M-19, X-2, M-10, MMA-01 y M-15, y Precipitación Media Mensual Estación Ujina**



*Fuente: Modificado a partir de Arcadis, 2018.*

Luego, en la Figura 4-6 se presenta información de la profundidad de niveles freáticos en los pozos que se ubican en el Salar (nomenclatura “MMA-XX”), mientras en la Figura 4-7 la de aquellos pozos que se ubican en las cercanías del Salar (nomenclatura “M-XX”). En la profundidad del nivel

freático se ve de manera muy clara el efecto de los eventos de precipitación en la elevación de los niveles, y la posterior estabilización, retornando al comportamiento o tendencia que se observa más de largo plazo.

También se observa que en los pozos ubicados en el Salar los niveles están por lo general bajo los 2 m (excepto en el pozo MMA-06 y, por algunos periodos de tiempo, en MMA-07 y MMA-11), lo que es concordante con el hecho de que, dado que no hay presencia de niveles someros (menos de 2 m), se establece que no hay evaporación en la situación actual para el balance hídrico (ver acápite 4.2.1).

Por otro lado, también se constata el descenso generalizado en los niveles desde 2003-2004 hasta aproximadamente 2012. Luego de los eventos de precipitación de gran magnitud del verano de 2012, los niveles se elevan, pero en vez de volver a descender (tal como se observa en el evento de precipitación de 2011), se mantienen estables durante un par de años. Esto coincide también con un descenso en las extracciones en el pozo P-7/7B por parte de Quebrada Blanca, lo que podría explicar, a lo menos en parte, la estabilización de los niveles en estos años. A partir de 2015 se observa una recuperación generalizada de los niveles, la que se mantiene hasta los últimos datos disponibles. Acá cabe mencionar que desde el segundo semestre de 2019 hay un cambio en la reportabilidad de los datos, manteniéndose de manera consistente en el tiempo las mediciones solo en los pozos MMA-01, MMA-02 y MMA-03, razón por la cual dejan de haber registros de nivel para los demás pozos del salar. De esta forma, estos tres pozos son los que tienen mayor registro histórico de niveles.

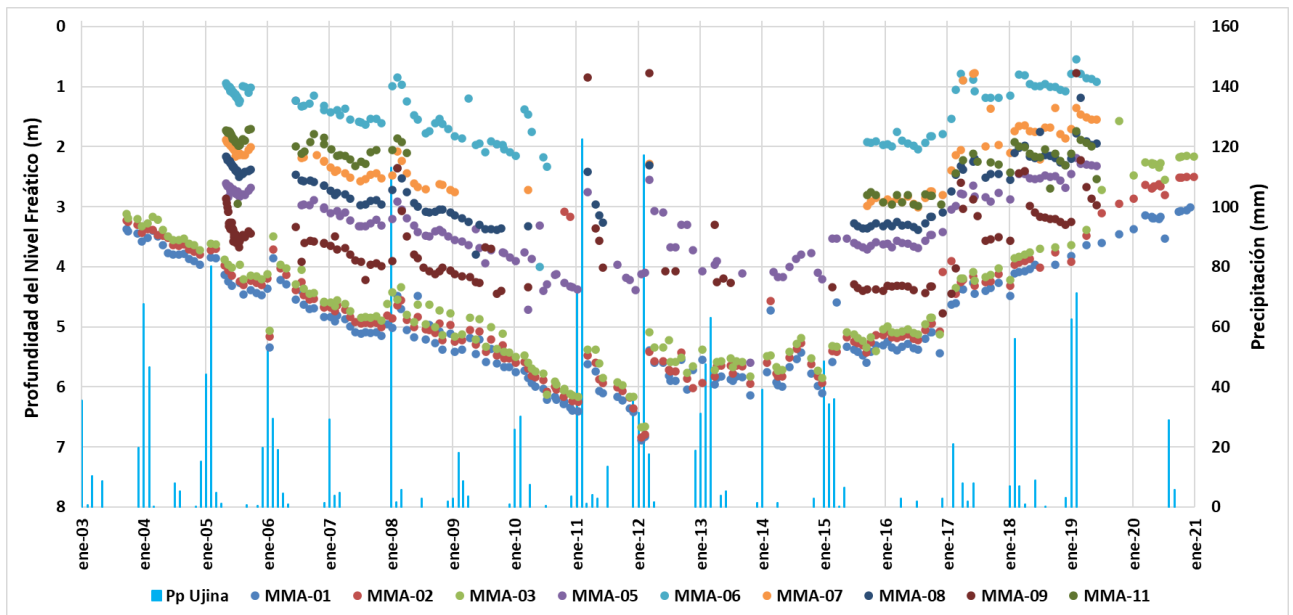
A su vez, es importante constatar que los pozos MMA-06, MMA-07 y MMA-11, que, tal como se señaló anteriormente, muestran los niveles más someros en el salar, son a su vez los pozos ubicados en las cotas más bajas (ver Tabla 4-1), lo que también es coherente con el funcionamiento del sistema hidrogeológico, en cuanto al movimiento de las aguas hacia el depocentro de la cuenca desde el oeste y el este para su posterior movimiento hacia el norte, con dirección a Coposa (ver acápite 4.2.2).

Los pozos con nomenclatura “M-X” corresponden a los que se ubican en las cercanías del Salar de Michincha. Tal como se ve en la Figura 4-7, los niveles son, en general, más profundos que en el Salar mismo. En los pozos con niveles más someros (M-16, M-17 y M-18) se observa el efecto que tienen los eventos de precipitación, con una elevación de los niveles después de la lluvia y luego un descenso hasta los niveles que muestran el comportamiento más de largo plazo. Los pozos más profundos (M-10, M-14, M-15 y M-19), por su parte, muestra un comportamiento más estable y sin los cambios bruscos característicos de la respuesta directa a la precipitación. No obstante lo anterior, alrededor de 2003 (en un momento en que hay un aumento de las extracciones en el pozo 7/7B) en todos los pozos se empieza a observar un descenso en los niveles que se mantiene aproximadamente hasta 2015, cuando comienza a observarse una recuperación de los niveles, la cual continúa hasta los últimos datos disponibles.

Por último, en la Figura 4-8 se presentan en conjunto las extracciones en el pozo 7B con los niveles en algunos pozos representativos (M-14, M-17, MMA-02 y MMA-03). Tal como puede observarse

ahí, se tiene una concordancia en la temporalidad de los efectos. Así, desde el comienzo de los registros de nivel en los pozos M-10, M-14 y M-17 (los más antiguos) se mantienen estables hasta el inicio del bombeo en el pozo 7B. Luego, desde el inicio del bombeo en 1993 hasta 1996 se observa un leve descenso en los niveles de los pozos mencionados, estabilizándose los niveles entre ese año y 2002 (periodo en el cual las extracciones también se muestran estables entre 30 y 40 L/s a nivel promedio anual). Entre 2003 y 2005 hay un fuerte aumento en el bombeo del pozo 7B, con caudales de extracción que se mantienen entre 60 y 80 L/s (como promedio anual) hasta 2011. En ese mismo periodo, los niveles muestran una profundización más marcada que la anterior, llegando a mínimos en 2012. Finalmente, desde 2012 las extracciones tienen un paulatino descenso hasta llegar a 0 en 2020 y 2021. Ese periodo coincide con una recuperación general de los niveles, que continúa hasta los últimos registros disponibles, los cuales se presentan cercanos a los niveles observados previo al inicio del bombeo.

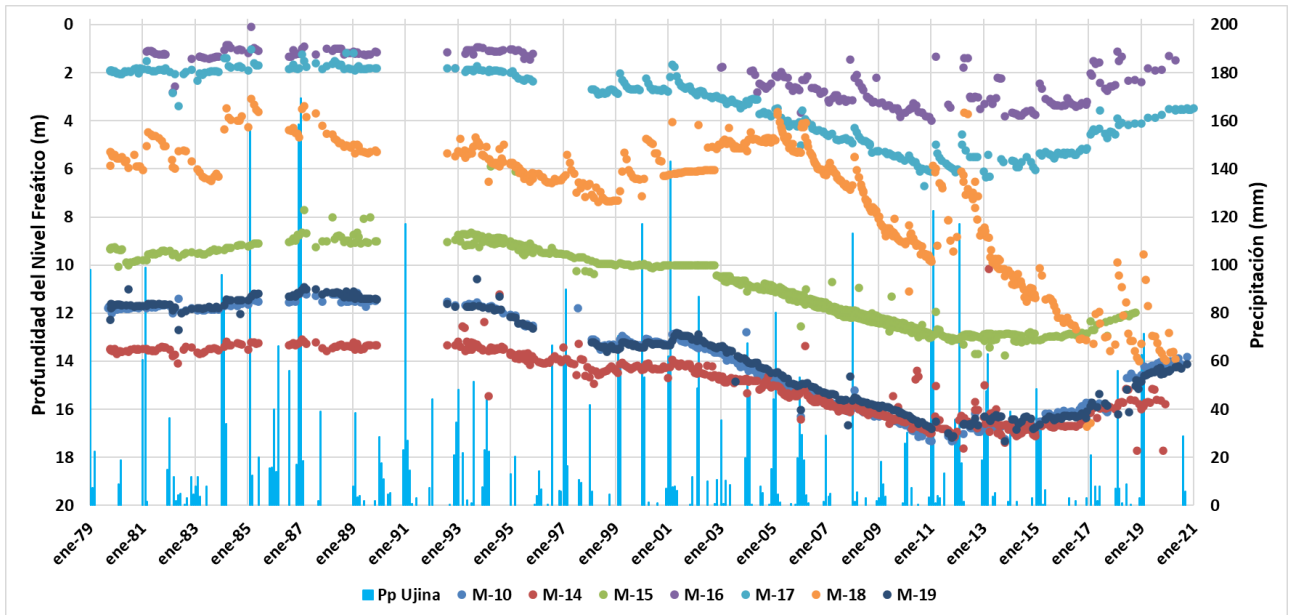
**Figura 4-6: Evolución Temporal de la Profundidad del Nivel Freático – Pozos MMA (en el Salar de Michincha)**



*Fuente: Modificado a partir de Arcadis, 2018.*

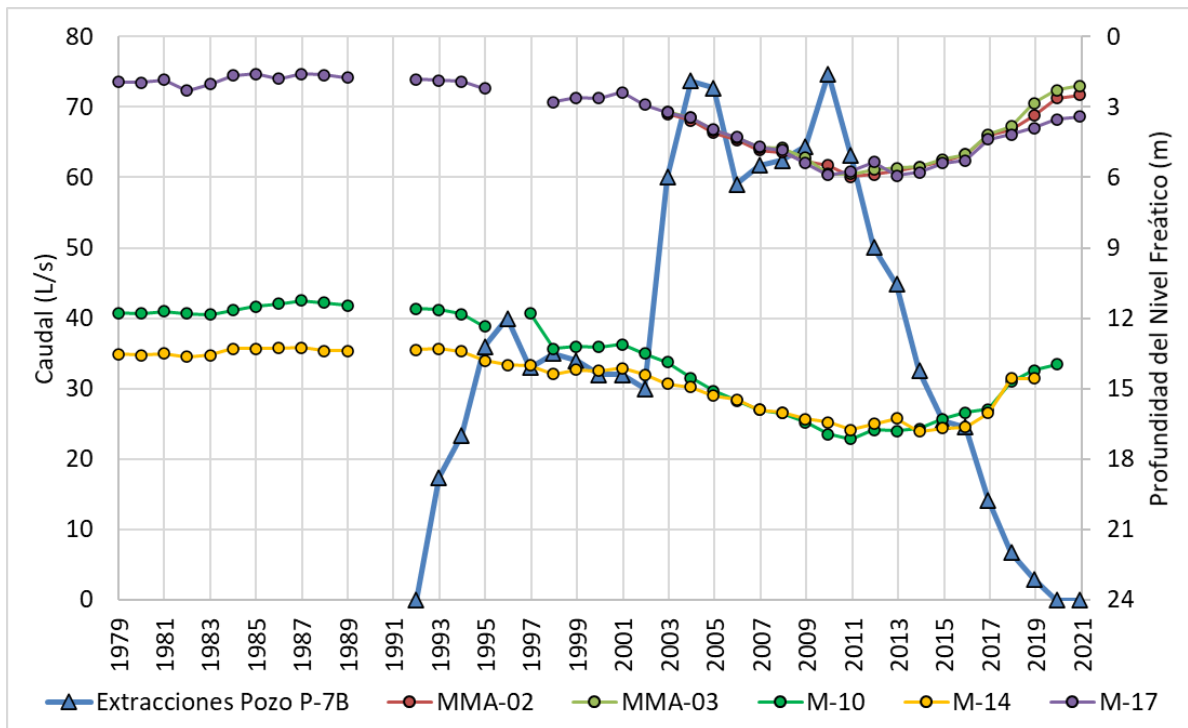


**Figura 4-7: Evolución Temporal de la Profundidad del Nivel Freático – Pozos M (cercanías Salar de Michincha)**



*Fuente: Modificado a partir de Arcadis, 2018.*

**Figura 4-8: Extracciones Pozo P-7B de Quebrada Blanca y Profundidades Nivel Pozos MMA-02, MMA-03, M-10, M-14 y M-17**



*Fuente: Elaboración propia.*

### ***4.1.2.3 Precipitaciones***

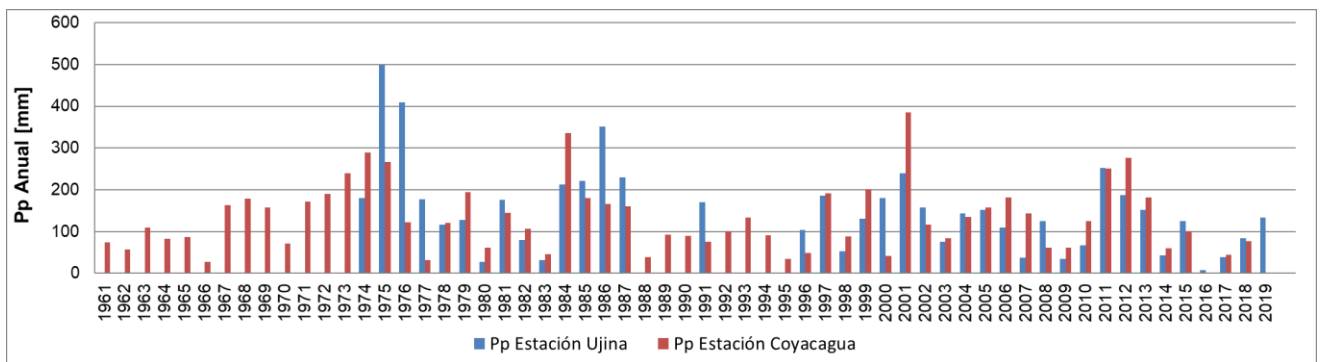
Para caracterizar las precipitaciones en el sector del Salar de Michincha se escogió la estación Ujina (ver ubicación en Figura 4-9), la cual se ubica en las inmediaciones de la faena de Collahuasi. La información que no se encuentra disponible en la estación Ujina (ubicada a 4.300 msnm) se rellenó con la correspondiente a la estación Coyacagua (ubicada a 4.013 msnm) (ver Figura 4-9). Esto se definió porque fue la estación de comportamiento y altura similares, y que contara con la información necesaria, más cercana a la estación Ujina. Una comparación entre ambas series de precipitación se presenta en la Figura 4-10. La serie completa de precipitación anual para la estación Ujina, rellenada con información de Coyacagua, se presenta en la Figura 4-11. En promedio caen aproximadamente 135 mm al año. Por otro lado, en la Figura 4-12 se presenta la distribución y la variabilidad de la precipitación en la misma estación. Se tiene una marcada estacionalidad, lo que queda representado en que en los meses de verano (diciembre – marzo) que concentran el mayor porcentaje de lluvias respecto del resto del año, siendo enero el mes con la mayor precipitación promedio. Entre un 85% - 90% de las precipitaciones ocurren en el periodo diciembre – marzo, en tanto que entre 15% - 10% ocurren en el resto del año (abril – noviembre). Cabe señalar también que en agosto se observa un pequeño aumento de la precipitación promedio, lo que indicaría que es en ese mes que se dan en mayor medida las precipitaciones que caen en el periodo invernal.

**Figura 4-9: Ubicación Estaciones Meteorológicas**



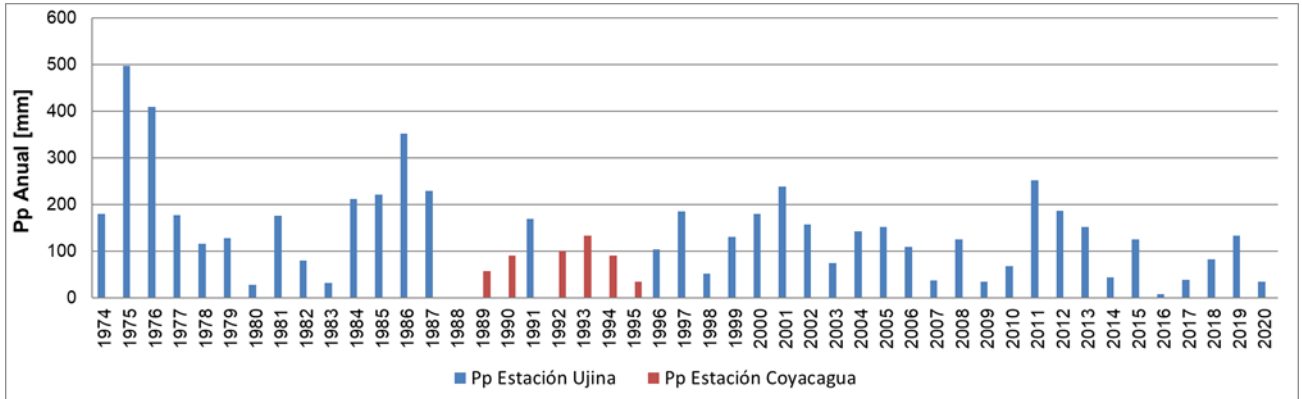
*Fuente: Elaboración propia.*

**Figura 4-10: Comparación Precipitaciones Estaciones Ujina y Coyacagua**



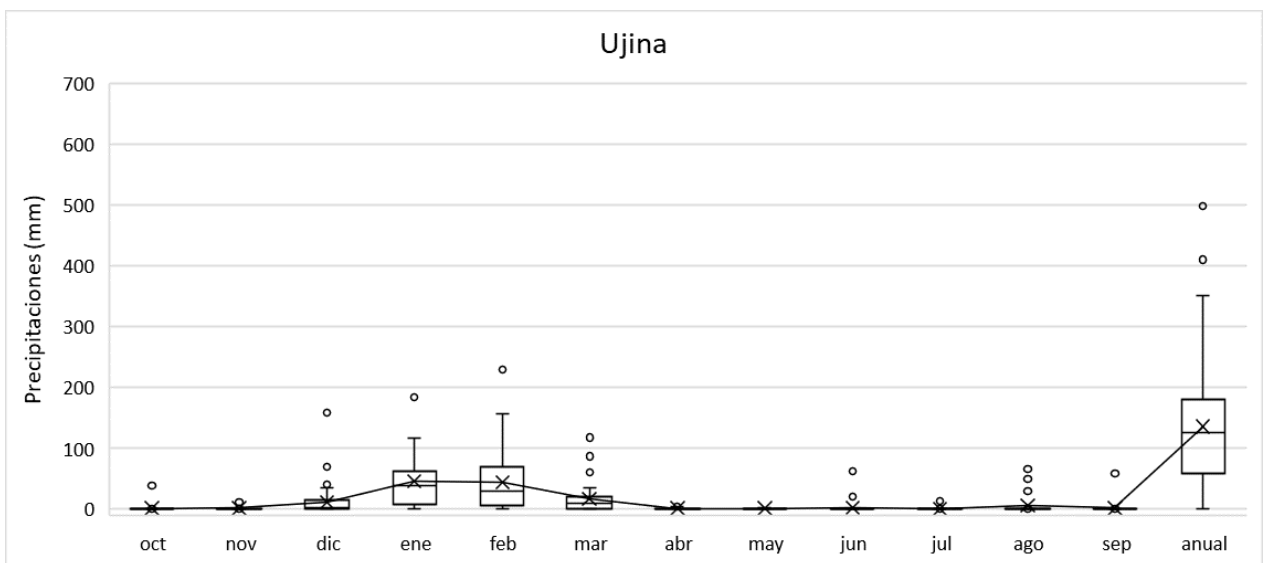
*Fuente: Elaboración propia.*

**Figura 4-11: Precipitación Anual Estación Ujina (Rellenada con Estación Coyacagua)**



*Fuente: Elaboración propia.*

**Figura 4-12: Distribución Mensual Precipitación Estación Ujina**



*Fuente: Elaboración Propia.*

### 4.1.3 Vegetación

Como ya ha sido señalado, el enfoque del presente trabajo es la vegetación azonal. En el Anexo A se presenta la definición general de las distintas categorías que la componen.

De acuerdo con Ahumada M. y Faúndez L. (2009), el área de influencia se encuentra en la Ecorregión altiplánica, donde el patrón dominante que determina la presencia de vegetación herbácea y arbustiva responde principalmente a factores zonales, los que presentan un continuo zonal influenciado por agentes forzantes o modeladores del paisaje, tales como las precipitaciones estivales, pendiente, exposición y altitud, principalmente.

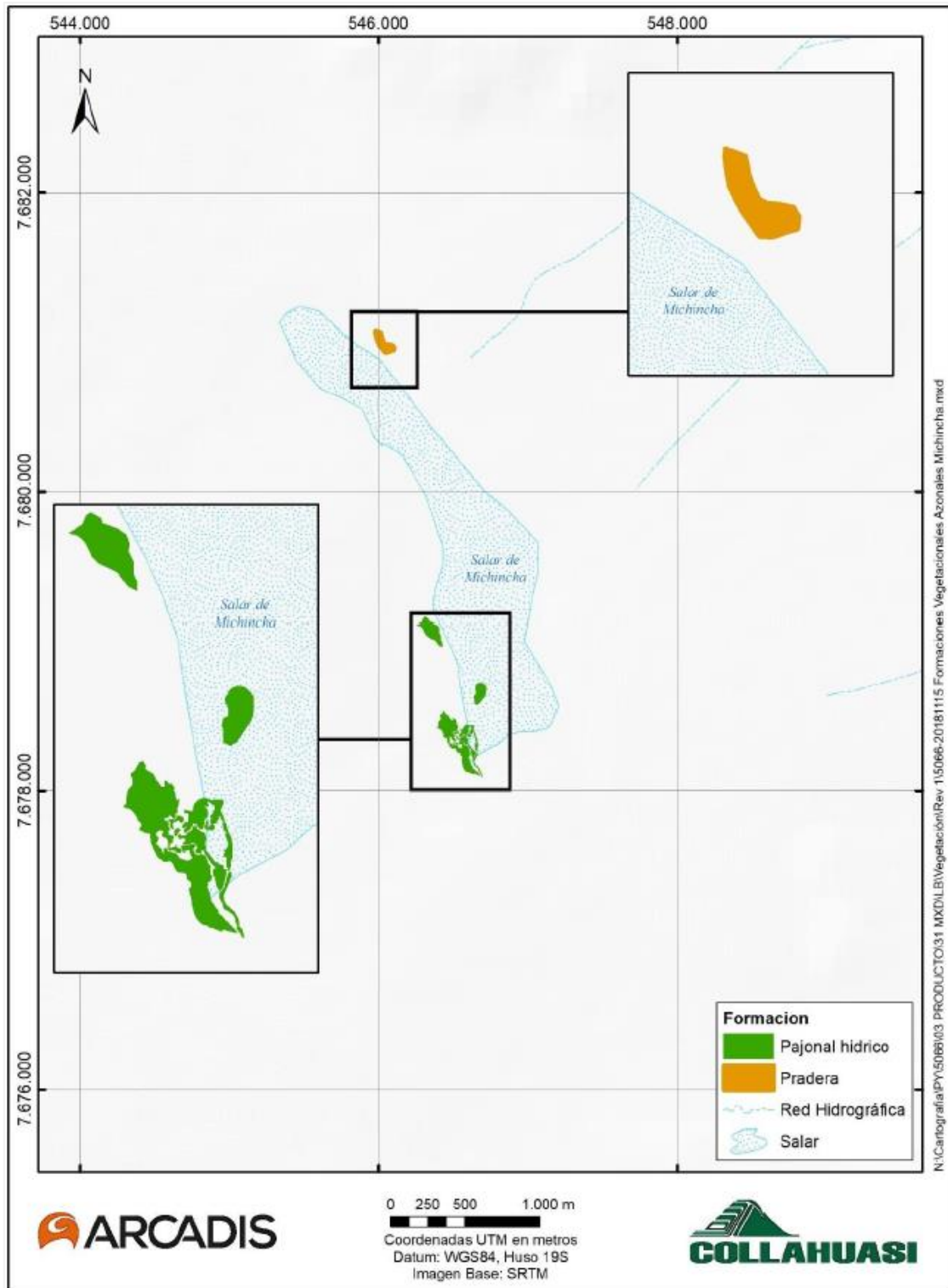
Los mismos autores señalan que las formaciones que hay en la ecorregión son las siguientes:

- Pajonales: corresponden a una formación vegetal compuesta por especies de gramíneas de crecimiento cespitoso. “Forman una champa tipo coirón” compuesta de pastos muy duros y toscos.
- Matorrales: formados por especies arbustivas de crecimiento bajo y de hojas reducidas y resinosas.

Respecto de la vegetación azonal, Gajardo (1994) menciona a los bofedales de *Oxychloë Andina* como un complejo florístico y vegetacional ubicado en los cursos de agua del altiplano, bien zonificadas desde lugares con aguas corrientes a aquellos más secos.

En la Figura 4-13 se presentan las formaciones de vegetación azonal en el Salar de Michincha.

**Figura 4-13: Formaciones Vegetacionales azonales en el Salar de Michincha**



*Fuente: Arcadis, 2018.*

A lo anterior se debe agregar también que las áreas ambientalmente sensibles de la cuenca de Michincha corresponden a zonas de vegas, bofedales y vertientes, todas contenidas en 4 acuíferos protegidos por la DGA (Resolución DGA N°909 de 1996): Yabricollita, Ujina, La Represa y Michincha (ver Anexo A).

## **4.2 FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLÓGICO DEL SISTEMA**

### **4.2.1 Balance Hídrico**

Dada la importancia de la intervención antrópica en la cuenca de Michincha (ya relevada previamente), como parte del EIA de Collahuasi (Collahuasi, 2018) se estimó un balance hídrico para los dos estados del sistema: régimen natural (es decir, previo al inicio de la intervención antrópica) y situación actual (correspondiente a diciembre de 2017). Las estimaciones se realizaron para ambos estados, considerando todas las salidas y entradas identificadas. A continuación, se detallan las recargas y descargas del sistema. Es importante recordar que Michincha se trata de una cuenca superficialmente endorreica.

- **Recargas del sistema:**

Los flujos que ingresan al sistema identificados fueron los siguientes:

- Recarga por precipitación (régimen natural y situación actual).
- Recarga por infiltración desde el depósito de relaves (sólo situación actual).

- **Descargas del sistema:**

Las salidas del sistema corresponden a las siguientes:

- Descargas por evaporación (sólo régimen natural, ya que en situación actual se considera que la profundidad del nivel no permite generar evaporación).
- Descargas por extracciones.
- Descargas por flujo subterráneo hacia Coposa (norte), El Loa (sur) (ambos en régimen natural y situación actual) y Huinquentipa/Chiclla (oeste, sólo situación actual, ya que en régimen natural esta descarga no existe).

En la Tabla 4-2 se presenta el balance hídrico para la cuenca de Michincha. La descarga producida por el afloramiento desde la vertiente Michincha no fue incluida en la suma de las salidas totales, ya que su efecto se encuentra incorporado de manera indirecta en las descargas por evaporación desde los cuerpos que aquella alimenta.

Para la situación actual aparece una entrada adicional, que corresponde a la infiltración desde el Depósito de Relaves, en tanto que las salidas contemplan una evaporación nula, dado que no hay niveles someros (a menos de 2 m de la superficie) capaces de generar flujos de evaporación.

Como puede verse en la Tabla 4-2, el desequilibrio entre las entradas y las salidas para la cuenca de Michincha alcanza los 319 l/s, lo que podría atribuirse a variaciones en el volumen almacenado en el sistema. Con respecto a la información del balance, la situación actual podría variar debido a

que, como ya se señaló anteriormente, los niveles han estado mostrado una recuperación. Si continúan su paulatino ascenso, podrían alcanzar el límite 1,5 – 2 m a partir del cual se genera evaporación. También en relación con lo señalado previamente, los niveles posiblemente se han recuperado en parte debido a la decisión de CMQB de dejar de extraer agua desde el pozo 7B, lo que a mediano o largo plazo podría implicar una recuperación de la vegetación en el salar, modificando también la salida por evapotranspiración. No obstante lo anterior, considerando la magnitud de los flujos en cuestión (extracciones CMQB y evapotranspiración) con respecto al desequilibrio entre entradas y salidas, por lo que no es posible saber si habrá una disminución en las variaciones del volumen almacenado en el sistema.

**Tabla 4-2: Balance Hídrico cuenca de Michincha**

Michincha	Régimen Natural		Situación Actual	
	Rango	Estimado	Rango	Estimado
<b>Entradas (l/s)</b>				
Recarga por precipitación	213 – 239*	215	213 – 239*	145
Infiltración desde Depósito de Relaves		0		94
<b>Total Entradas (l/s)</b>		<b>215</b>		<b>239</b>
<b>Salidas (l/s)</b>				
Evaporación	9,8 – 38	32		0
Evapotranspiración	9,8 – 29,9	20**	9,8 – 29,9	20**
Flujo Subterráneo hacia Coposa	21 – 244,4	145,6	18,1 – 216,7	124,8
Flujo Subterráneo hacia El Loa	3,3 – 67,4	16,8	3,3 – 67,4	16,8
Flujo Subterráneo hacia Huinquintipa y Chiclla		-	2 – 80,9	20,2
Desaguado rajo Ujina		-		13
Extracciones Pozos CMQB		-		62
Extracciones Pozos CMDIC		-		301,2
<b>Total Entradas (l/s)</b>		<b>215</b>		<b>558</b>
<b>Diferencia entre Entradas y Salidas (l/s)</b>		<b>0</b>		<b>-319</b>

\* Corresponde al rango entre los percentiles 25 y 75 de la recarga total estimada en Anexo 4.4 A – Estimación de la Recarga para Modelo Hidrogeológico Integrado Sector Cordillera del EIA de Collahuasi (2018).

\*\* Valor es para toda la cuenca, por lo que incluye vegetación más allá de la presente en el Salar de Michincha.

*Fuente: Arcadis, 2018.*

#### 4.2.2 Modelo Hidrogeológico Conceptual

En la cuenca de Michincha una de las fallas principales es la Falla Michincha, la cual pasa por el centro de la cuenca y coincide con su depocentro (Figura 10 del Anexo A, sección C-C' se cruza con la falla). Esto favorece el flujo de las aguas subterráneas en dirección noroeste. El principal relleno de la cuenca corresponde a la Ignimbrita Ujina (Figura 10 del Anexo A, sección transversal C-C' como referencia), que puede alcanzar una potencia máxima de aproximadamente 400 m. De esta forma, el flujo de agua subterránea va primeramente en dirección al centro de la cuenca (que corresponde a su parte más baja), para luego enfilarse hacia el norte, en dirección a la cuenca de



Coposa, y lo hace de manera preferencial por el flanco este del cerro Pabellón del Inca. Tal como se señaló en el acápite anterior, también se tiene un flujo en dirección sur, hacia la cuenca del río Loa) a través de la Ignimbrita Ujina. En el límite sureste de la cuenca de Michincha, los niveles no muestran conexión hidráulica con la aledaña cuenca de Alconcha, no obstante, comparten la misma zona de recarga correspondiente al volcán Olca (ver Figura 7 del Anexo A).

Tal como se señaló previamente, en 1993 comenzó la intervención antrópica de la cuenca de Michincha con las extracciones de agua subterránea que inició Quebrada Blanca. Collahuasi, por su lado, inicia los procesos de su faena minera con la explotación del rajo Ujina, el depósito de relaves de Pampa Pabellón y otras instalaciones en 1998, mientras que en el año 2005 comienza la explotación de recursos hídricos subterráneos de manera de recuperar las aguas que hubieran infiltrado desde el depósito, tanto al sur como al noreste de aquel.

Al comparar la piezometría en régimen natural y situación actual, es posible ver que, debido al desaguado del rajo Rosario, la divisoria de aguas subterráneas entre la cuenca de Michincha y las subcuencas de Huinquentipa y Chiclla, que en régimen natural coincidía con la divisoria de aguas superficiales, se mueve hacia el este, induciendo un flujo pasante desde la cuenca de Michincha hacia las subcuencas de Huinquentipa y Chiclla.

Para la cuenca de Michincha, se tienen las siguientes entradas:

1. Recarga por precipitación (régimen natural y situación actual);
2. Recarga por infiltración desde el depósito de relaves (solo situación actual).

Por otro lado, se tienen las siguientes salidas:

1. Descargas por evaporación (solo régimen natural);
2. Descargas por evapotranspiración (régimen natural y situación actual);
3. Descargas por conexión a otras cuencas: hacia el norte, a cuenca de Coposa (régimen natural y situación actual); hacia el sur, cuenca del río Loa (régimen natural y situación actual); y hacia el oeste, a subcuencas Huinquentipa/Chiclla (solo situación actual).
4. Descargas por extracciones (solo situación actual).

## 5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 5.1 ANÁLISIS DE IMÁGENES SATELITALES

#### 5.1.1 Resultados Análisis Imágenes Satelitales

Como ya se señaló, el objeto del presente trabajo consiste en generar un modelo o estimador que permita enlazar la información meteorológica y de niveles con la de áreas de vegetación. Para generar las áreas de cobertura de vegetación se trabajó con imágenes Landsat para el periodo 1985 – 2021. Para esto, se analizó una imagen por mes, es decir, más de 400 imágenes para todo el periodo.

Se trabajó con imágenes Landsat 5 y Landsat 8, dada la confiabilidad que hay en la calidad de esas imágenes. Se intentó trabajar con imágenes Landsat 7, pero debido al problema que presentan estas imágenes, se decidió dejarlas fuera. Esto, ya que el trabajo de rellenar esa información añadía un grado de incertidumbre mayor, debido a que se está ingresando información que no es real, si no generada de manera artificial. Es importante mencionar que a partir del cambio de satélite no se observan diferencias significativas (atribuibles al cambio referido) en los valores calculados con el índice.

Entre la Figura 5-1 y Figura 5-4 se presenta la serie de tiempo completa (1985 – 2021) para la cobertura vegetal generada a partir del análisis de las imágenes satelitales y el trabajo con el NDVI, a las que agregan distintos elementos para el análisis, el que se detalla a continuación.

En la Figura 5-1 se muestra la serie de tiempo de la cobertura vegetal, en conjunto con los niveles en los pozos MMA-02, MMA-03 y M-17 y los principales hitos ocurridos en la cuenca de Michincha. Así, desde el inicio de la serie (enero de 1985) hasta el inicio de las extracciones de agua subterránea por parte de Quebrada Blanca (en 1993) se tiene un comportamiento estacional de la cobertura vegetal, con máximos entre diciembre y abril (marcados con color verde) y mínimos en invierno. Lo anterior, en parte por la mayor disponibilidad de agua en verano al generarse derretimiento de la nieve, así como también por la respuesta que muestran los niveles a los eventos de precipitación, los cuales suelen ocurrir en el periodo estival (invierno altiplánico). La mayor disponibilidad de agua también implica que los niveles sean más someros y, en consecuencia, que haya mayor evaporación, que es la situación en este caso también (ver Figura 14 y Tabla 2). En invierno, por otro lado, hay menores temperaturas y, eventualmente, también hay caída de nieve. Ambos elementos pueden generar un retraimiento de la vegetación (en términos de vigor, tamaño, color, entre otros), lo que podría manifestarse luego en menores áreas de cobertura vegetal en los meses de invierno (teniendo la prevención de que se esté midiendo efectivamente vegetación no activa y no cobertura nival). En relación con lo anterior, en la Figura 5-2 se muestra el detalle para el rango de áreas entre 0 y 60 ha para todo el periodo. Ahí se ve que, cercano al periodo en que comienza el desaguado del rajo Ujina, comienza un descenso en las áreas de vegetación, de manera más marcada en las áreas mínimas. Esto se ve con rezago en los niveles debido a los grandes

eventos de precipitación en los veranos de 1999, 2000 y 2001 que elevaron los niveles. Así, se tiene que desde 2002 hasta 2012, un periodo en que se tiene un aumento consistente en las extracciones y en que no hay grandes eventos de precipitación como los antes mencionados, las áreas mínimas llegan a valores muy bajos, consistentes con un descenso marcado de los niveles en este mismo periodo.

Antes de 1993 se tienen máximos que en general superan las 120 ha de vegetación y mínimos que en general están por encima o alrededor de 20 ha. Además, al hacer una diferenciación del NDVI en dos rangos (rango de menor vigor: 0,13 – 0,2; y rango de mayor vigor: 0,2 – 1), se tiene que para el periodo 1985-1993 el área correspondiente al primer rango (el área cubierta por vegetación de menor vigor) corresponde a un 53%, en tanto que la de mayor vigor corresponde a un 47%. Cabe señalar, observando también la Figura 5-3, que los niveles máximos son más elevados en los años en que se registran eventos de precipitación más importantes. Así, por ejemplo, se tiene que las áreas máximas se tienen en los veranos de 1985, 1986, 1987 y 1991, que corresponden también a los veranos con los mayores eventos de precipitación registrados (pueden ser eventos únicos o más de uno distribuidos en varios días). Esto muestra también cierto nivel de respuesta del sistema a la precipitación, el cual se superpone a la estacionalidad antes mencionada.

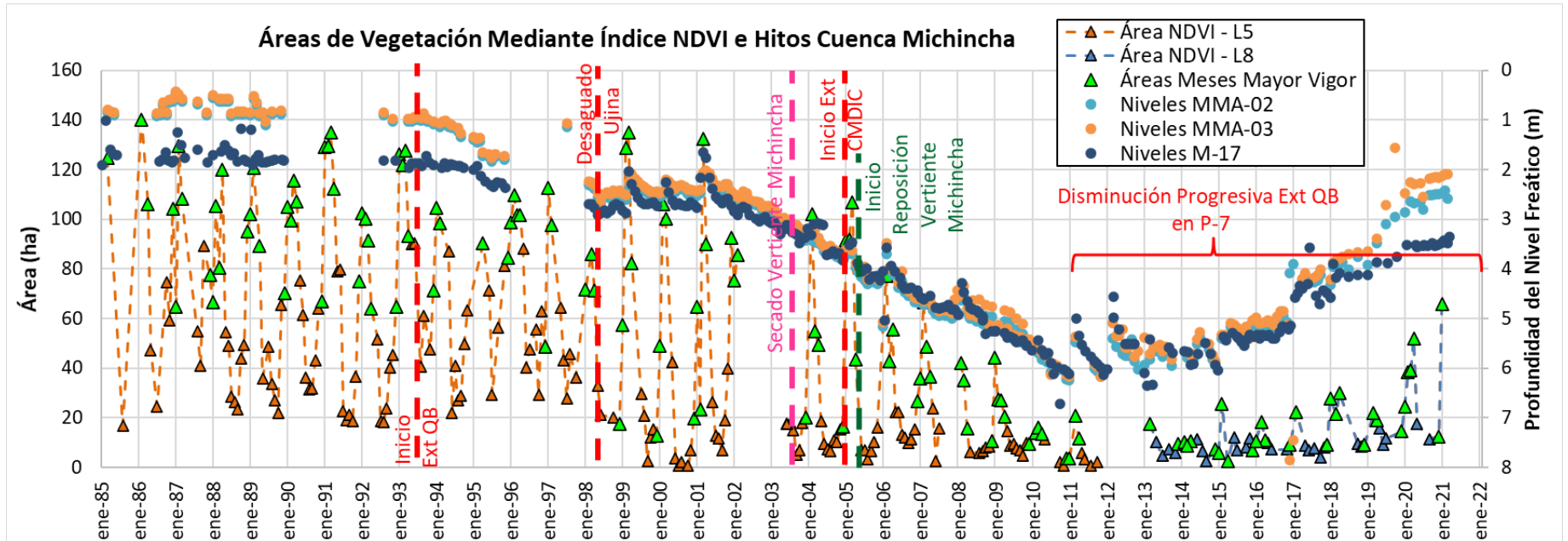
Luego del inicio de las extracciones por parte de QB, en el periodo que va de 1993 a 1998, se observa una disminución de los máximos en las áreas, que pasan a estar más cerca de 100 ha (ver Figura 5-1). No obstante, los mínimos se sostienen por encima de las 20 ha, lo que parecería indicar que, si bien las extracciones podrían estar afectando al sistema, este todavía se mantiene relativamente estable. A lo anterior se debe agregar que para el periodo no se tienen eventos de precipitación de la magnitud de los señalados anteriormente (con meses que pueden llegar a registrar casi 170 mm de agua caída, ver Figura 5-3). El mes con más agua en este periodo corresponde a enero de 1997, con 90 mm. Ese mismo mes se tiene la máxima cobertura vegetal, con casi 113 ha. De todas formas, es importante mencionar que durante este periodo recién comienzan las extracciones y que, en promedio, no se superan los 30 l/s (el promedio del periodo 1993 – 1998 alcanza poco más de 26 l/s tomado como caudal medio anual, ver Figura 5-4).

En 1998 comienza el desaguado del rajo Ujina por parte de Collahuasi (ver Figura 5-1). A partir de ese momento, se observa que los mínimos disminuyen y pasan a estar en algunos momentos por debajo de las 20 ha, que era el mínimo no traspasado previamente. También se tienen descensos en las áreas máximas, situación que queda algo disimulada por los eventos de precipitación importantes que hay en los veranos de 1999, 2000 y 2001 (ver Figura 5-3), una situación similar a la que se explicó con respecto a los niveles anteriormente (ver acápite 4.1.2.2). Las extracciones, por otro lado, se mantienen en niveles similares a los vistos anteriormente hasta 2003 (ver Figura 5-4). Tal como se demarca con una línea color fucsia en las distintas figuras referidas, en algún momento de 2003 la vertiente Michincha se seca, lo que es constatado por parte de las autoridades en enero de 2004. Acá, es importante mencionar que no se cuenta con imágenes satelitales disponibles para el periodo febrero/2002 – julio/2003.

En la Figura 5-4 se ve que desde 2003, y hasta 2011, hay un aumento sustantivo de los caudales extraídos por parte de Quebrada Blanca, el cual aumenta como promedio para ese periodo hasta casi 66 l/s como caudal medio anual, más del doble de lo visto en el periodo anterior. Las extracciones anuales llegan a un máximo en 2010, con un valor de casi 75 l/s como caudal medio anual. A esto se debe agregar que en 2005 comienzan las extracciones en la cuenca de Michincha por parte de Collahuasi, mismo año en que esta empresa inicia la reposición comprometida en la vertiente Michincha. En la Figura 5-1 se ve que durante todo el periodo en cuestión (2003 – 2011) se tiene un descenso constante en las áreas de cobertura vegetal (similar a lo que se ve para los niveles en el acápite 4.1.2.2), independiente de que, tal como se puede ver en la Figura 5-3, las áreas siguen mostrando una respuesta a los eventos de precipitación que ocurren en la época estival.

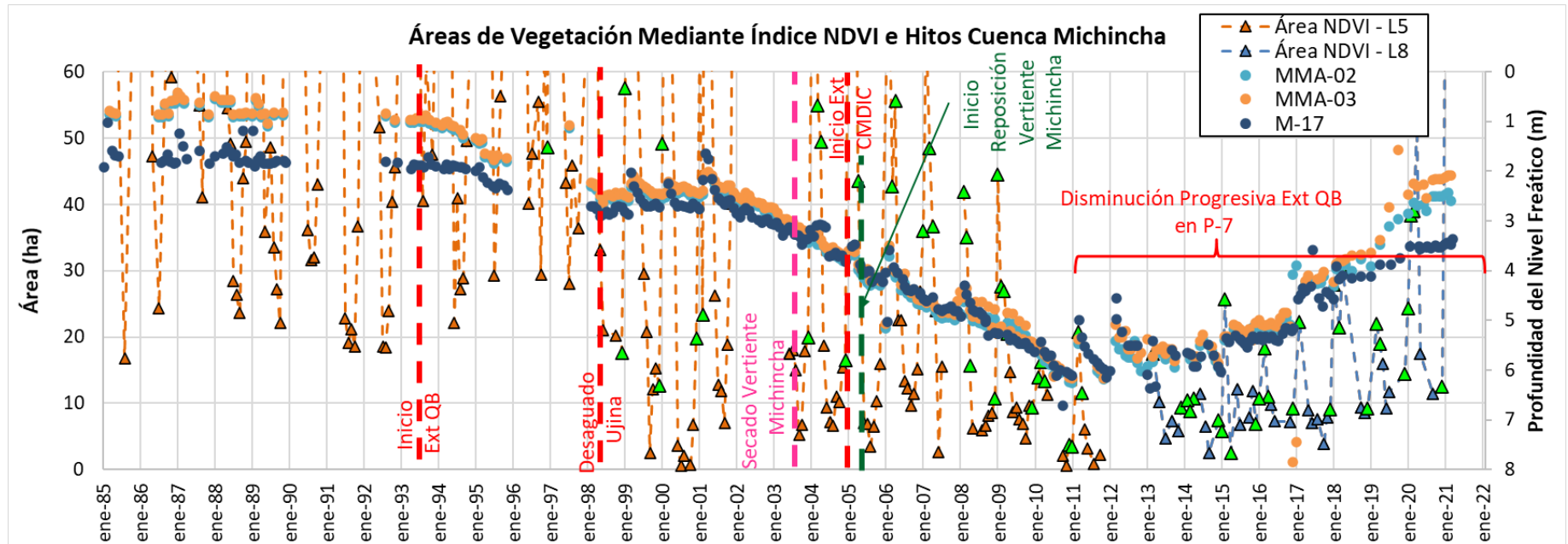
Posterior a 2011, comienza una reducción marcada y constante de las extracciones en el pozo P-7B por parte de QB, tal como se demarca en la Figura 5-1 y observa en la Figura 5-4. Como contrapartida, se observa una recuperación de las áreas de cobertura vegetal, con aumentos de los máximos y los mínimos que se mantienen hasta la última información analizada, en enero de 2021. Cabe hacer la comparación para el caso inverso, cuando hubo aumento de las extracciones y disminución de las áreas entre 2003 y 2011 (misma Figura 5-4), ya que ahí se observa una relación más directa entre ambas variables, en tanto posterior a ese año las áreas no se recuperan tan rápido, si no que se mantienen relativamente estables hasta 2018, cuando comienza a mostrar aumentos más sostenidos. Esto podría dar cuenta de cómo funciona el sistema vegetacional, en cuanto a que las disminuciones de las áreas, pasado cierto valor umbral hacia abajo, cambia su configuración a un estado de un algún tipo de latencia. Al analizar más en detalle las recuperaciones desde enero de 2019 en adelante, se tiene que las áreas con menor vigor corresponden a un 65% del área total, en tanto que las de mayor vigor corresponden a un 35%. Lo anterior configura un aumento de la vegetación de mayor vigor, dado que para los 10 años anteriores (2009-2018) las áreas de menor vigor constituyeron un 84% del total. De todos modos, el sistema sigue mostrando una respuesta frente a los eventos de precipitación de las épocas veraniegas, tal como puede verse en la Figura 5-3.

Figura 5-1: Serie de Tiempo (1985-2021) Áreas Cobertura Vegetacional Mediante NDVI e Hitos Cuenca



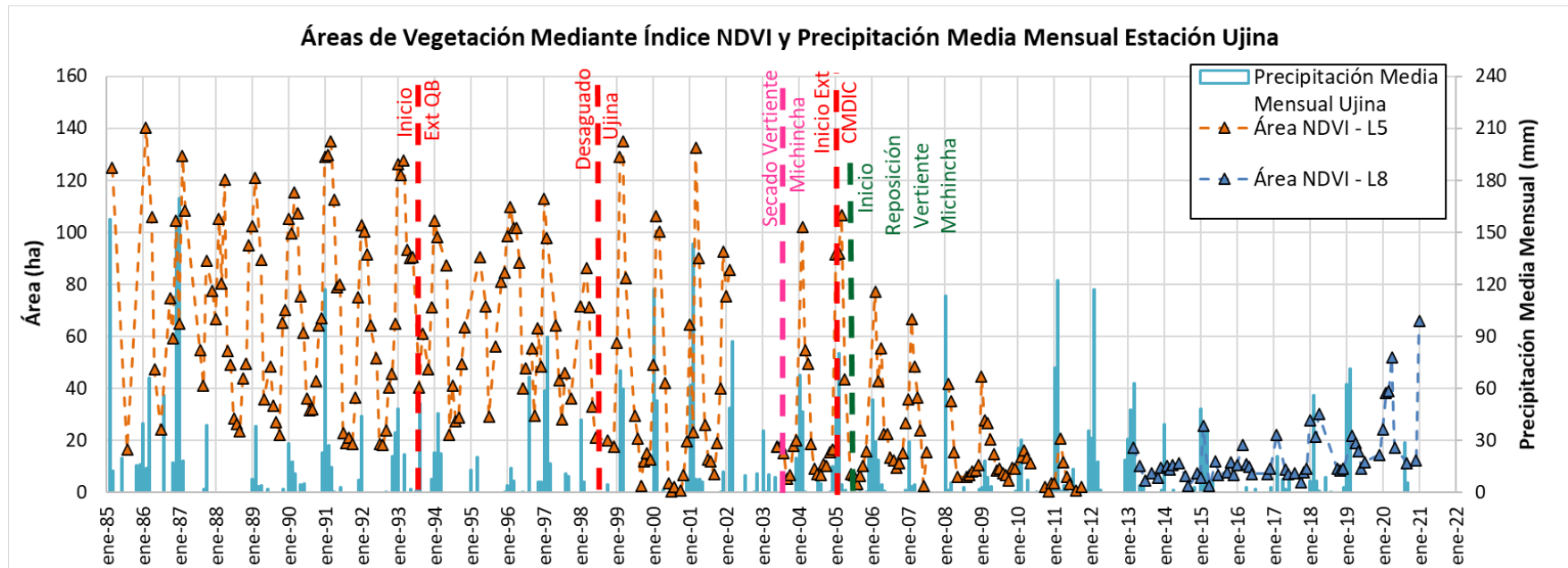
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 5-2: Serie de Tiempo (1985-2021) Áreas Cobertura Vegetacional Mediante NDVI e Hitos Cuenca – Detalle Áreas < 60 ha



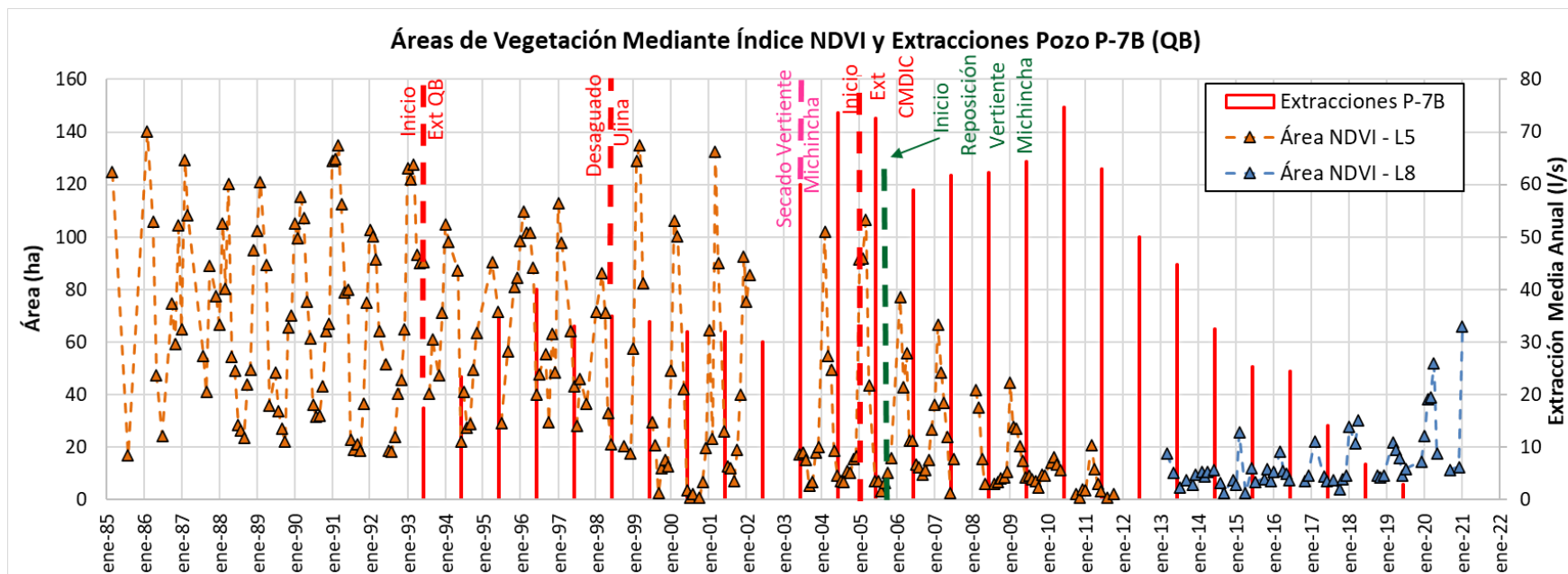
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 5-3: Serie de Tiempo (1985-2021) Áreas Cobertura Vegetacional Mediante NDVI y Precipitación



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 5-4: Serie de Tiempo (1985-2021) Áreas Cobertura Vegetacional Mediante NDVI y Extracciones Pozo P-7/7B



Fuente: Elaboración Propia.



### 5.1.2 Sensibilización NDVI y Cambio Temporal en las Áreas

A continuación, se realizaron dos análisis adicionales con respecto a la generación de áreas de cobertura de vegetación, con el objeto de comprender de mejor manera tanto el funcionamiento del índice NDVI como el comportamiento en el tiempo de las áreas generadas a partir de este último.

En primer lugar, se hizo una sensibilización del índice NDVI para algunas fechas específicas. Como ya se señaló anteriormente, el valor umbral para el NDVI utilizado fue 0,13. Lo que se hizo fue variar ese valor a 0,11 y 0,10 y así ver cómo cambian las áreas generadas. Las fechas seleccionadas y las razones para su elección fueron las siguientes:

- Marzo de 1985: fecha previa a la intervención antrópica en la cuenca.
- Enero de 1992: fecha antes del inicio de las extracciones por parte de QB.
- Marzo de 1998: fecha en que se tienen aproximadamente 5 años de bombeo de QB y cercana al inicio del desaguado del rajo Ujina.
- Junio de 2003: fecha en que se tienen casi 10 años de extracciones por parte de QB (parten en 1993) y 5 años de desaguado del rajo Ujina (parte en 1998), pero antes de que se inicien las extracciones de agua subterránea por parte de Collahuasi. Es alrededor de esta fecha que se seca la vertiente Michincha, y se elige también una fecha en invierno que permita analizar la sensibilización durante esta época del año (no hay cobertura nival en este mes en particular).
- Marzo de 2008: fecha en que se tienen aproximadamente 5 años de bombeo de Collahuasi,
- Marzo de 2013: fecha en que hay aproximadamente dos años de un descenso de las extracciones por parte de QB.
- Diciembre de 2018: situación en que se tienen 7 años de descenso en las extracciones por parte de QB en el Salar de Michincha.
- Enero de 2021: situación actual.

El resultado anterior se presenta en la Tabla 5-1. Es importante mencionar que se hizo la diferenciación entre la vegetación con un NDVI con valores entre el umbral que se esté usando y 0,2 (color verde claro) y aquella con valor de NDVI entre 0,2 y 1 (valor límite del índice). Esto, con el objeto de poder contrastar tanto áreas de vegetación como tipos, ya que valores entre el umbral y 0,2 indican presencia de vegetación, pero pudiendo esta ser menos sana o más escasa, en tanto que valores mayores del NDVI indican presencia de vegetación más sana y con mayor vigor. Para complementar lo anterior, se agregó también la Tabla 5-2, en que se presentan las áreas totales y la relación entre el área con vegetación más sana / de mejor vigor y la total para las diferentes sensibilizaciones del NDVI.

En primer lugar, se analizó cómo cambia el NDVI al ir variando el valor de corte para el NDVI a partir del cual se estima que hay presencia de vegetación. Para marzo de 1985, en la Tabla 5-1 se puede ver gráficamente que no hay gran diferencia al ir variando el umbral de NDVI. Esto se puede constatar también en la Tabla 5-2, donde se ve que tanto en las áreas totales como en la relación área vegetación activa / área total no hay grandes cambios. Esto puede deberse a que, previo a la intervención antrópica de la cuenca, la vegetación se encuentra en parte importante en buen estado

de sanidad y vigor, por lo que variar el umbral de presencia de la vegetación no implica grandes cambios.

Para junio de 2003 la situación cambia, ya que al variar el umbral de NDVI sí hay cambios en las áreas totales, lo que implica que el índice es sensible a variaciones para situaciones más desfavorables del estado de la vegetación. Es importante recordar que en junio de 2003 van 10 años de extracciones en el pozo P-7B, y además se trata del periodo de invierno (época de vegetación con la menor actividad en el año).

Al observar los cambios en las otras fechas, se ve que, si bien hay variabilidad, es importante constatar que en las dos fechas con áreas mayores (marzo 2013 y enero 2021) las variaciones tanto de las áreas como de la relación antes mencionada es menor que para la fecha donde las áreas son más pequeñas (diciembre 2018), lo que es coherente con lo que se señaló con respecto a marzo de 1985. Se profundizará en este tema en el capítulo de Conclusiones.

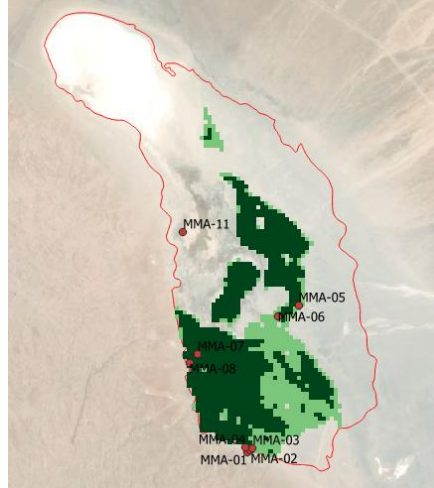
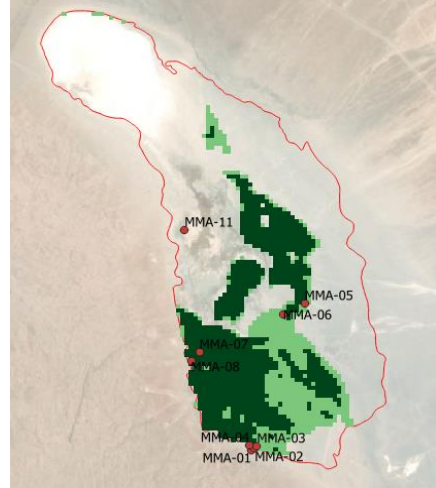
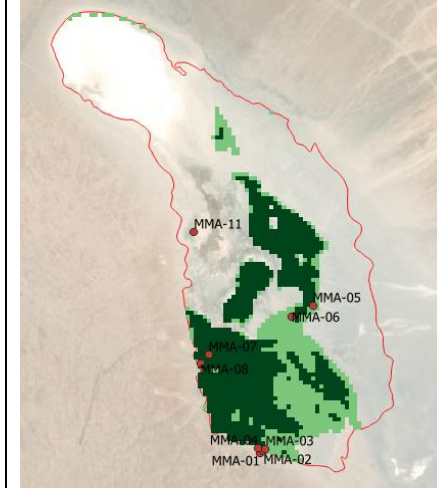
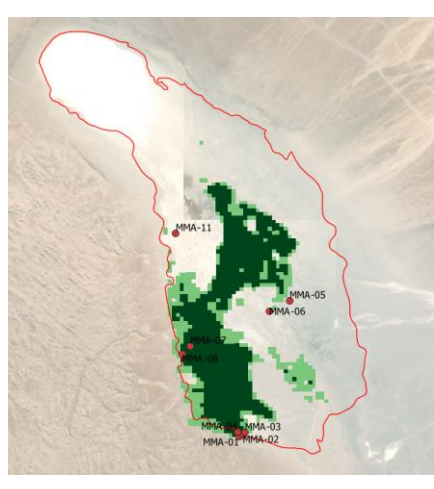
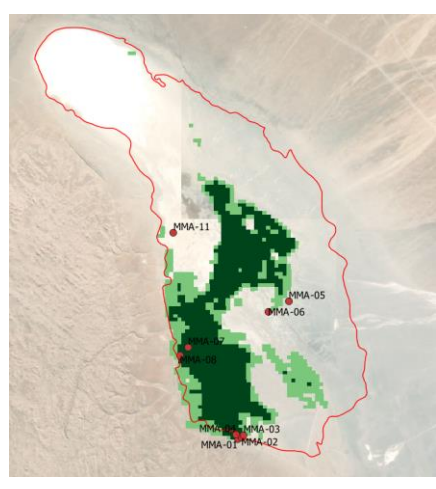
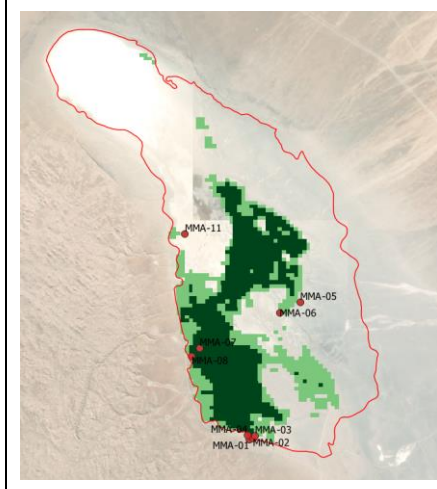
En forma ulterior, se hizo el análisis de variación temporal de las áreas. Para esto, se agregó también la Tabla 5-2, en que se presentan las áreas totales y la relación entre el área con vegetación más sana / de mejor vigor y la total para las diferentes sensibilizaciones del NDVI.

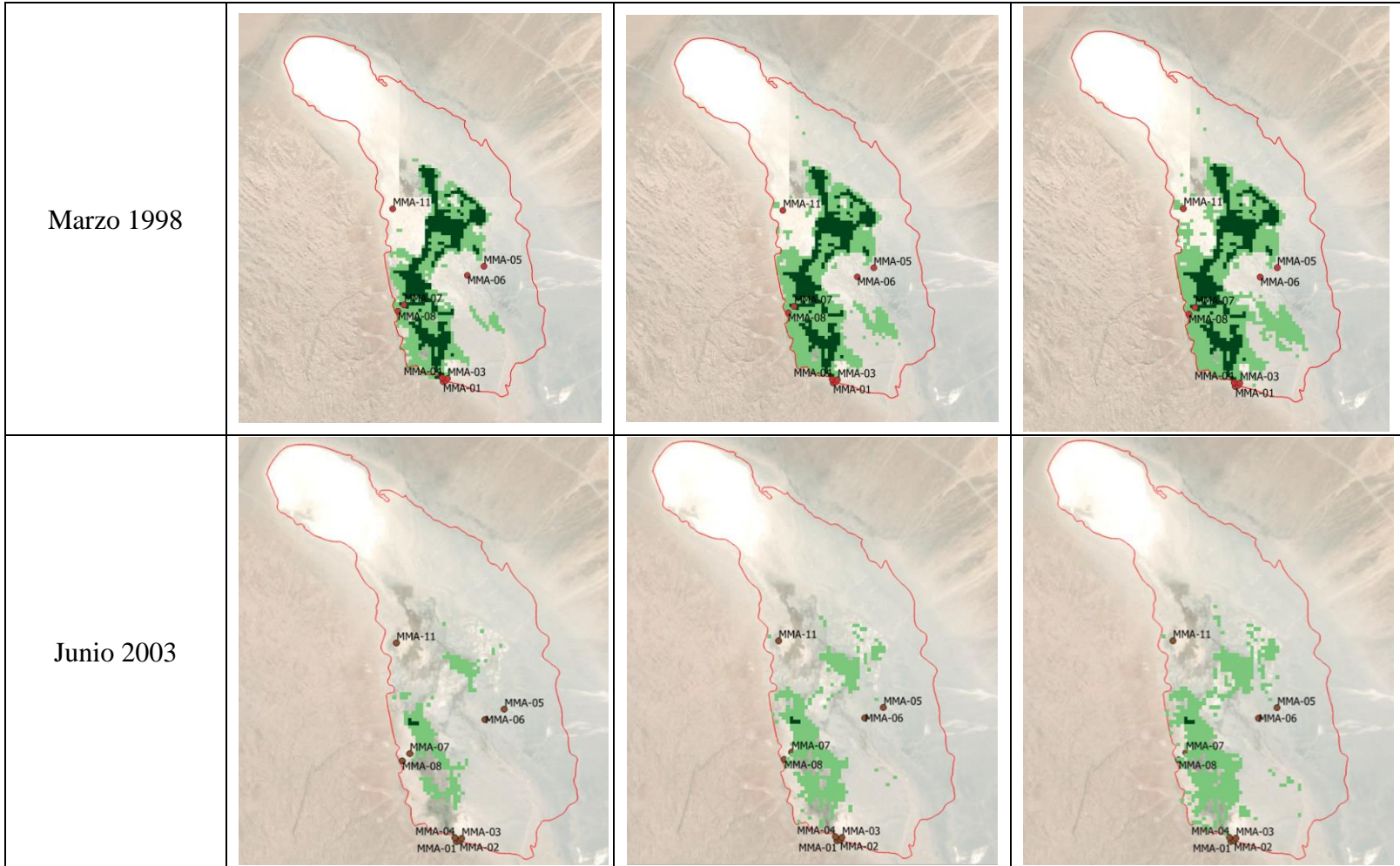
Con respecto a la variación temporal de las áreas, se tiene que al ir avanzando en la Tabla 5-1 por las columnas de arriba abajo, se observa que para cualquier valor del NDVI hay, en general, una disminución en las áreas de cobertura, lo que se condice con lo señalado en referencia a las series de tiempo de las áreas (ver acápite anterior). El mayor cambio se observa entre 1985 y 2003, ya que se comparan momentos en que no había intervención antrópica y otro en el cual van 10 años de extracciones por parte de QB en Michincha (ver los cambios de áreas y en la relación entre área de vegetación más sana / de mayor vigor en la Tabla 5-2).

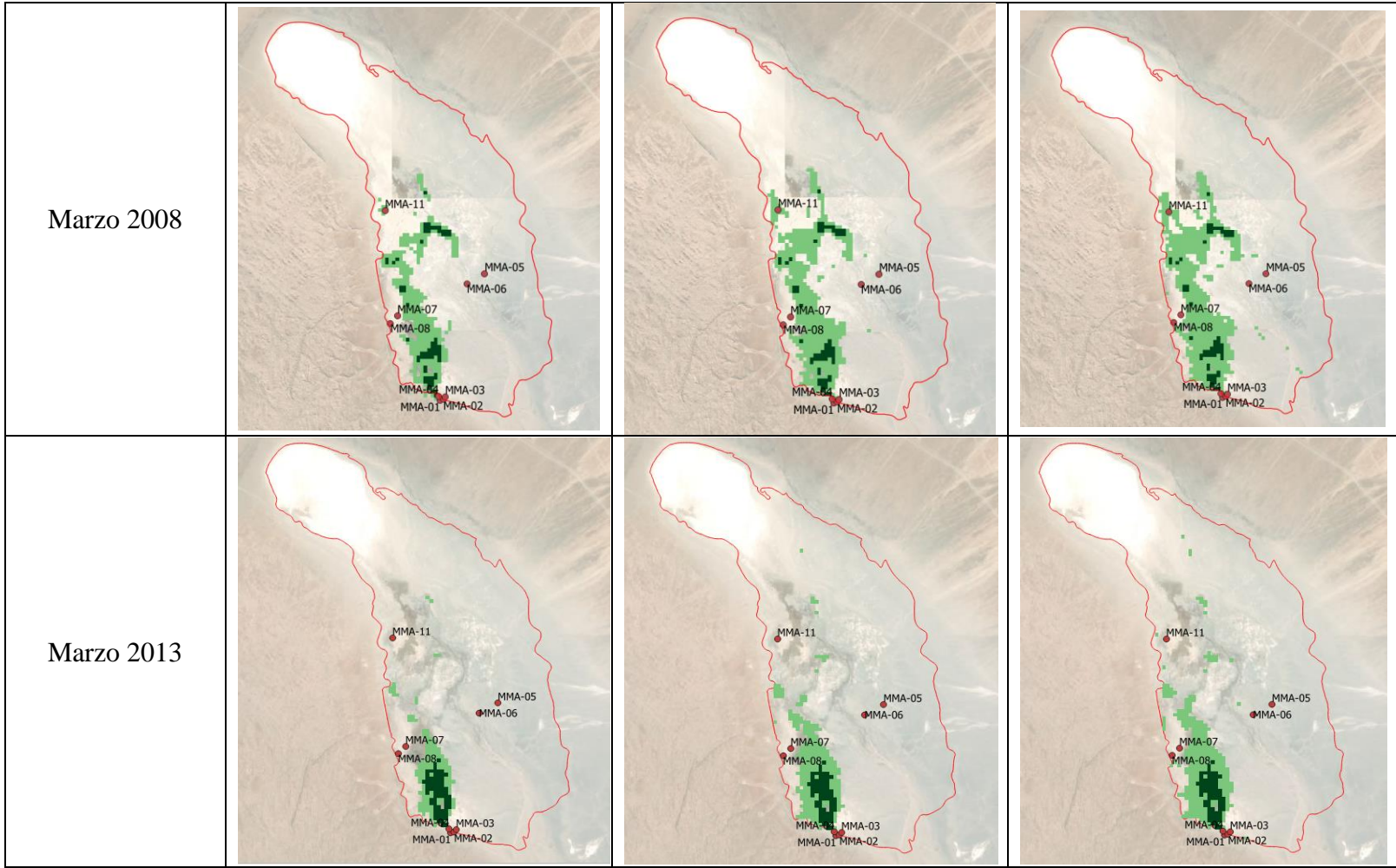
Luego, entre 2003 y 2013 se observa una recuperación de las áreas de cobertura vegetal, aunque con áreas de vegetación de mayor vigor / más sana menores. A diciembre de 2018 se observa un descenso tanto en el área total como en la vegetación más sana / de mayor vigor, aunque se debe considerar que en marzo de 2013 está incorporado el efecto de los eventos de precipitación que hubo entre diciembre de 2012 y ese mismo mes (que totalizan 160,7 mm en los 4 meses), en tanto que en diciembre de 2018 no se alcanza a incorporar el efecto de las lluvias estivales. Para ambos cambios, ver también la Tabla 5-2.

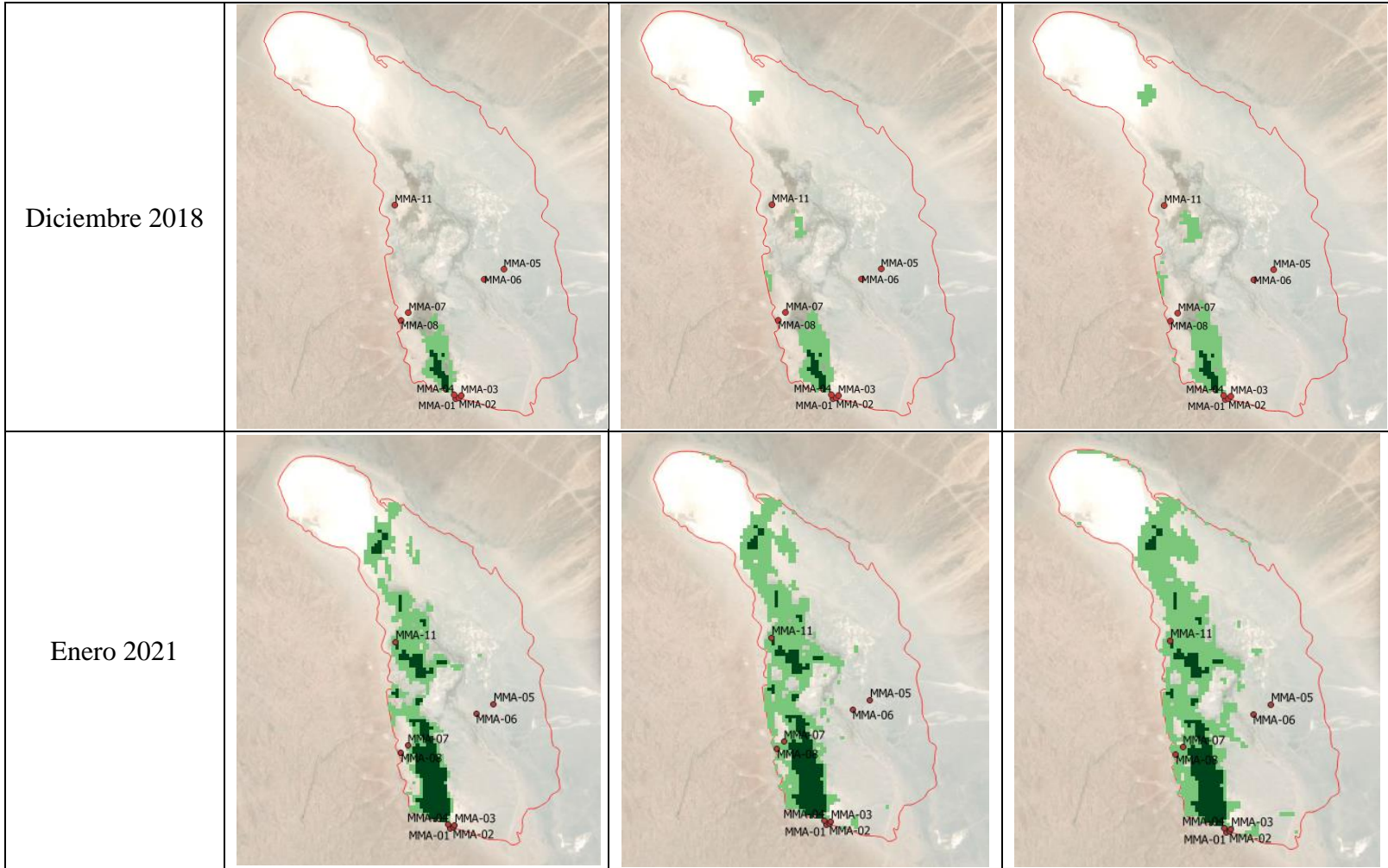
Por último, en enero de 2021 se observa una recuperación general de las áreas vegetales, tanto total como la más sana / de mayor vigor. Tal como se señaló anteriormente, esto se observa desde 2019 en adelante, cuando se tiene que las áreas correspondientes a vegetación de mayor vigor corresponden a un 35%, en tanto que en la década anterior (2009-2018) esta correspondió, en promedio, solo a un 16%. Hay que sopesar el hecho de que para esta fecha ya se tienen casi 10 años de una reducción de las extracciones en el pozo P-7B, y que desde 2005 Collahuasi ha mantenido de forma ininterrumpida la reposición en la vertiente Michincha. Respecto a esto último, es importante ver la fila correspondiente a enero 2021 en la Tabla 5-2.

**Tabla 5-1: Sensibilización Índice NDVI (Verde claro: NDVI entre valor umbral 0,13 y 0,2; Verde Oscuro: NDVI entre 0,2 y 1)**

Fecha	NDVI $\geq 0,13$	NDVI $\geq 0,11$	NDVI $\geq 0,10$
Marzo 1985			
Enero 1992			







Fuente: Elaboración Propia.

**Tabla 5-2: Áreas Totales y Relación Entre Área de Vegetación Más Sana y la Total**

<b>Fecha</b>	<b>NDVI <math>\geq 0,13</math></b>	<b>NDVI <math>\geq 0,11</math></b>	<b>NDVI <math>\geq 0,10</math></b>
Marzo 1985	Área Total = 124,74 ha Valor $\frac{\text{Área NDVI} \geq 0,2}{\text{Área Total}} = 69\%$	Área Total = 129,69 ha Valor $\frac{\text{Área NDVI} \geq 0,2}{\text{Área Total}} = 66\%$	Área Total = 132,12 ha Valor $\frac{\text{Área NDVI} \geq 0,2}{\text{Área Total}} = 65\%$
Enero 1992	Área Total = 102,6 ha Valor $\frac{\text{Área NDVI} \geq 0,2}{\text{Área Total}} = 67\%$	Área Total = 112,23 ha Valor $\frac{\text{Área NDVI} \geq 0,2}{\text{Área Total}} = 62\%$	Área Total = 112,23 ha Valor $\frac{\text{Área NDVI} \geq 0,2}{\text{Área Total}} = 62\%$
Marzo 1998	Área Total = 86,13 ha Valor $\frac{\text{Área NDVI} \geq 0,2}{\text{Área Total}} = 40\%$	Área Total = 103,14 ha Valor $\frac{\text{Área NDVI} \geq 0,2}{\text{Área Total}} = 34\%$	Área Total = 117 ha Valor $\frac{\text{Área NDVI} \geq 0,2}{\text{Área Total}} = 30\%$
Junio 2003	Área Total = 17,37 ha Valor $\frac{\text{Área NDVI} \geq 0,2}{\text{Área Total}} = 2\%$	Área Total = 33,39 ha Valor $\frac{\text{Área NDVI} \geq 0,2}{\text{Área Total}} = 1\%$	Área Total = 44,37 ha Valor $\frac{\text{Área NDVI} \geq 0,2}{\text{Área Total}} = 0,81\%$
Marzo 2008	Área Total = 35,01 ha Valor $\frac{\text{Área NDVI} \geq 0,2}{\text{Área Total}} = 17\%$	Área Total = 48,87 ha Valor $\frac{\text{Área NDVI} \geq 0,2}{\text{Área Total}} = 12\%$	Área Total = 57,33 ha Valor $\frac{\text{Área NDVI} \geq 0,2}{\text{Área Total}} = 11\%$
Marzo 2013	Área Total = 17,46 ha Valor $\frac{\text{Área NDVI} \geq 0,2}{\text{Área Total}} = 38\%$	Área Total = 25,83 ha Valor $\frac{\text{Área NDVI} \geq 0,2}{\text{Área Total}} = 25\%$	Área Total = 30,60 ha Valor $\frac{\text{Área NDVI} \geq 0,2}{\text{Área Total}} = 21\%$
Diciembre 2018	Área Total = 9,18 ha Valor $\frac{\text{Área NDVI} \geq 0,2}{\text{Área Total}} = 25\%$	Área Total = 15,03 ha Valor $\frac{\text{Área NDVI} \geq 0,2}{\text{Área Total}} = 15\%$	Área Total = 19,62 ha Valor $\frac{\text{Área NDVI} \geq 0,2}{\text{Área Total}} = 11\%$
Enero 2021	Área Total = 65,97 ha Valor $\frac{\text{Área NDVI} \geq 0,2}{\text{Área Total}} = 35\%$	Área Total = 93,06 ha Valor $\frac{\text{Área NDVI} \geq 0,2}{\text{Área Total}} = 25\%$	Área Total = 109,17 ha Valor $\frac{\text{Área NDVI} \geq 0,2}{\text{Área Total}} = 21\%$

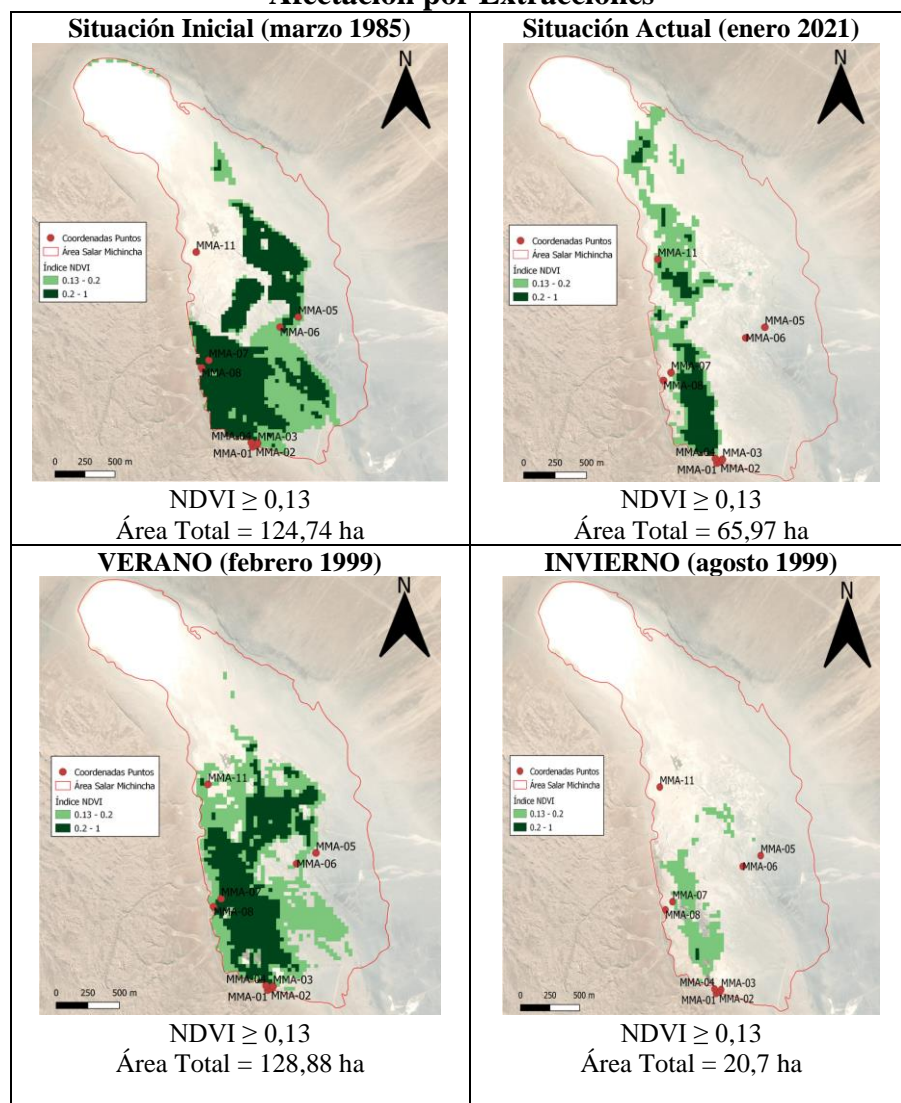
*Fuente: Elaboración Propia.*

Luego, y a modo de complemento con lo anterior, se hacen comparaciones entre situaciones que se estiman importantes para analizar el cambio en las áreas en el tiempo. Primero, se compara la situación inicial y final de las áreas de cobertura vegetal; luego, se compara la situación para verano e invierno para un año sin el efecto pronunciado de las extracciones realizadas por QB (febrero y agosto de 1999); y, por último, una comparación similar a la anterior, pero con el efecto de las extracciones de QB más internalizado en el funcionamiento del sistema (febrero y agosto de 2009). Esto se presenta en la Tabla 5-3.

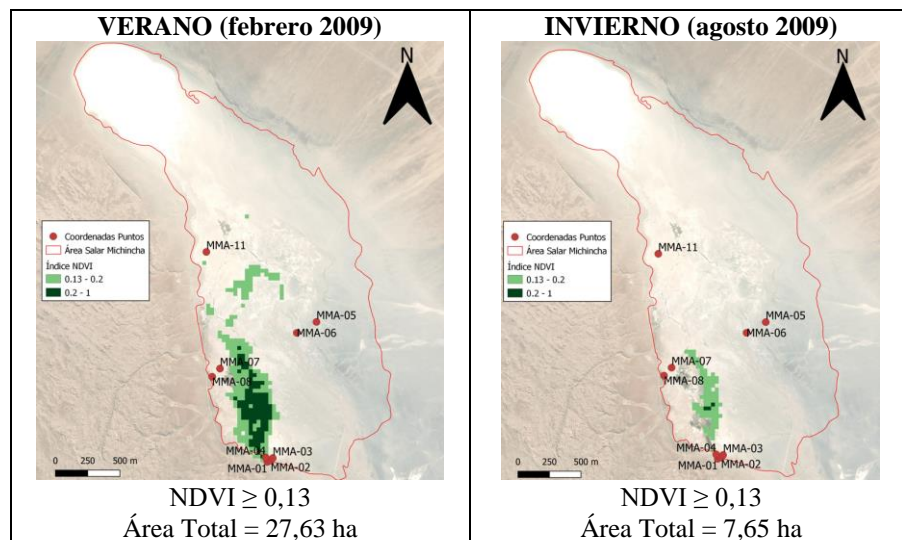
A continuación, para el verano e invierno de 1999 se observa la variación intraanual del sistema en cuando a áreas de cobertura vegetal según las condiciones de la época del año que se trate, tal como ya se ha detallado anteriormente. Al hacer la comparación para las mismas épocas, pero de 2009, se observa que el efecto de las extracciones se manifiesta en ambas épocas del año.

Finalmente, es importante mencionar que, como parte de la experiencia profesional, se ha sabido de casos en que una explicación para los cambios en las áreas han sido los usos culturales (como la actividad de arrieros, por ejemplo) y/o quemas realizadas en esos sectores. Para el presente trabajo se investigó si ocurría alguna situación de este tipo en el Salar de Michincha, más no se encontró nada que mostrara que ocurre algo similar, por lo que se descarta que algo así pudiera estar impactando en el sistema analizado.

**Tabla 5-3: Comparación entre Situación Inicial y Actual; Verano e Invierno Sin y Con Afectación por Extracciones**







*Fuente: Elaboración Propia.*

Hay un cambio importante entre la situación inicial y actual, con áreas que bajan casi a la mitad, lo que también se ve reflejado en las áreas de mejor salud / vigor. También se observa un cambio en la distribución de las áreas, que pasa de estar más bien distribuido por el sur del salar a uno que está más bien distribuido en el eje norte-sur y más apegado hacia el borde oeste del salar.

Para intentar entender lo anterior, entre la Figura 5-5 y la Figura 5-14 se hizo una comparación entre los transectos realizados como parte del EIA de Collahuasi con las áreas de vegetación obtenidas a partir del índice NDVI. A partir de estas imágenes, hay algunos elementos importantes a resaltar.

En primer lugar, se tiene una comparación de las distintas estaciones del año. Tal como se ha señalado anteriormente, se observa que, en los inviernos analizados, las áreas de vegetación obtenidas son las más pequeñas del año, y esto coincide también con las áreas de menor vigor (color verde más pálido), a diferencia de los veranos donde se observan áreas de mayor vigor (color verde más oscuro).

Por otro lado, al observar más en detalle la dinámica anual de crecimiento y disminución de las áreas de vegetación se tiene que esta se presenta con crecimientos primordialmente en el eje norte – sur, y también que en las épocas de mayor crecimiento (veranos de 2015 y 2018) se detectan valores de NDVI más elevados más al norte y apegados al borde oeste del salar, lo que podría ser indicativo de que lo señalado anteriormente en cuanto a que sería una característica más estructural del sistema vegetativo.

Con respecto al tipo de vegetación detectada en las transectas, en la Tabla 5-4 se presentan los tipos de especies más comunes detectados en las transectas realizadas como parte del EIA de Collahuasi, el nombre común y la distribución según el estudio del SAG (esto últimos dos elementos, a partir de Ahumada M. y Faúndez L. (2009). En términos gruesos, se tiene que el hábito hídrico de aquellas especies asociadas a bofedales es de mayor sensibilidad a la cercanía con el agua que aquellas asociadas a pajonales, las cuales son más resistentes y se adaptan de mejor forma a la falta

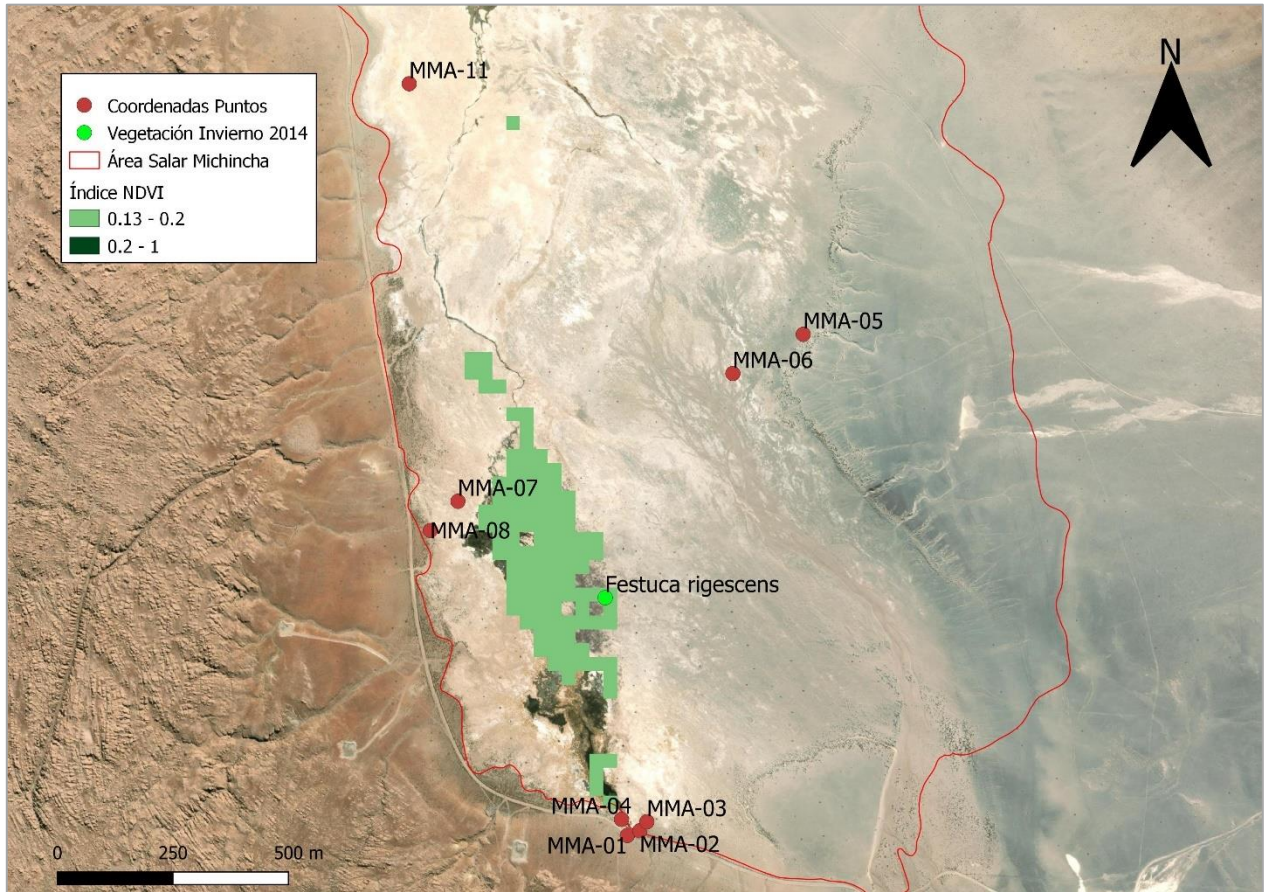
de agua. Asimismo, se pueden asociar las primeras al color verde más oscuro de las figuras en cuestión, mientras que las segundas se pueden asociar al color verde más claro. Mediante un cálculo de la cantidad de transectas de vegetación que se ubican dentro del área de vegetación obtenida a partir del índice NDVI, se tiene que más del 70% lo hacen, y en mayor cantidad aun lo hacen las especies de mayor hábito hídrico. Se estima que, dado el tamaño del píxel que se está trabajando (30 x 30 m para imágenes Landsat), esto es un buen resultado. Asociado con lo anterior, hay que agregar también que de las transectas que no se ubican dentro del área estimada, la enorme mayoría queda muy cerca del límite.

**Tabla 5-4: Tipos de Especie Detectadas en Salar de Michincha; Nombre Común y Distribución Según Estudio SAG**

<b>Tipo Especie</b>	<b>Nombre Común</b>	<b>Distribución Estudio SAG</b>
<i>Carex maritima</i>	Pasto vega	Vegas y Bofedales No Salinos
<i>Deyeuxia chrysophylla</i>	Desconocido	Pajonales hídricos salinos y en los ecotonos externos de bofedales y vegas salinas
<i>Deyeuxia curvula</i>	Desconocido	Pajonales hídricos salinos y en los ecotonos externos de bofedales y vegas salinas
<i>Festuca hypsophylla</i>	Waylla	Pajonales hídricos no salinos y salinos
<i>Festuca rigescens</i>	Waylla	Pajonales hídricos no salinos y salinos
<i>Lobelia oligophylla</i>	Vega suave	Vegas y bofedales no salinos
<i>Oxychloë andina</i>	Pako	Bofedales, vegas y pajonales hídricos no salinos
<i>Phylloscirpus acaulis</i>	Desconocido	Bofedales, vegas y pajonales hídricos, salinos y no salinos, especialmente estos últimos
<i>Ruppia filifolia</i>	Desconocido	Cursos de agua en vegas, pajonales hídricos y bofedales salinos
<i>Xenophyllum weddellii</i>	Pupusa de agua	Bordes salinos de depresiones endorreicas
<i>Zameioscirpus atacamensis</i>	Calpaco	Bofedales, vegas y pajonales hídricos salinos

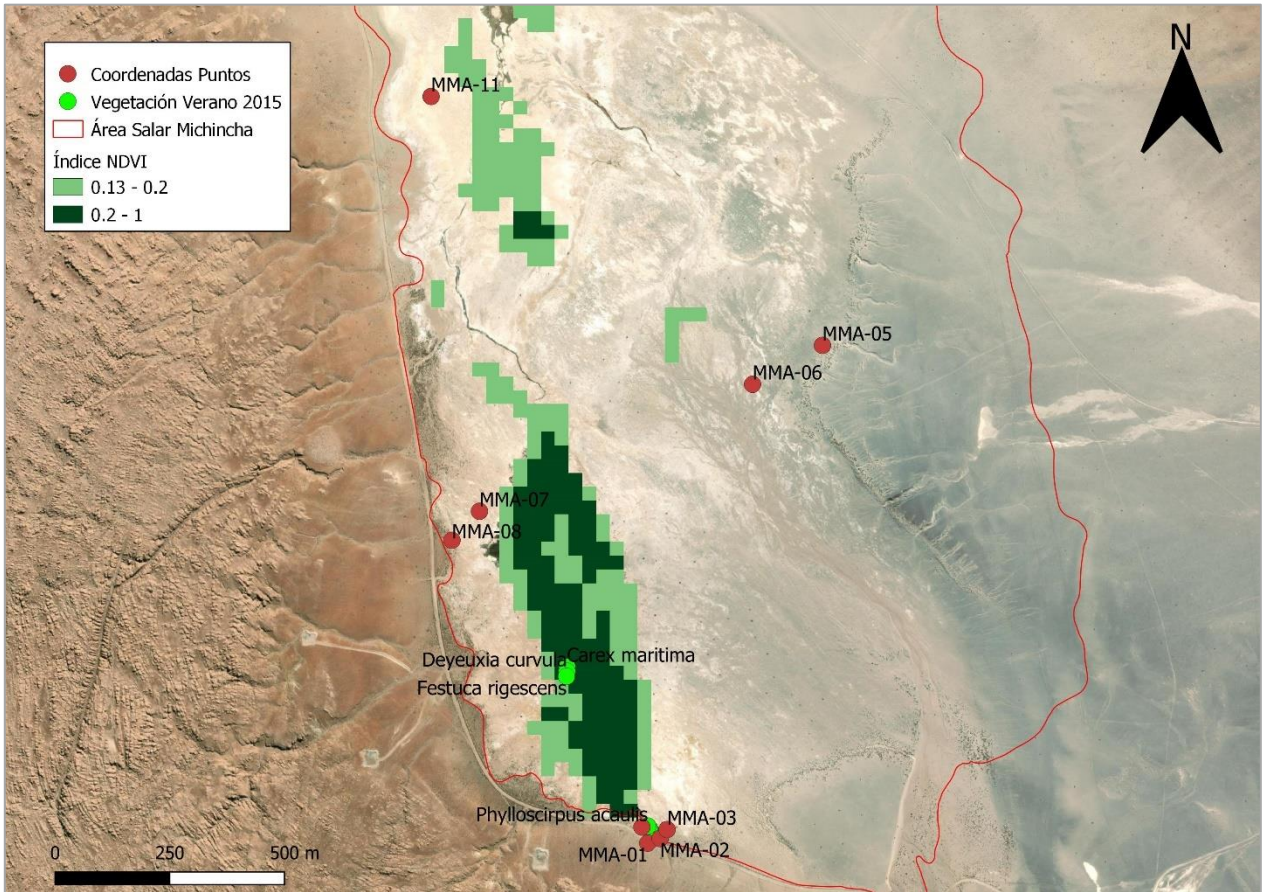
*Fuente: Elaboración Propia a partir de Ahumada M. y Faúndez L. (2009).*

**Figura 5-5: Comparación Áreas Mediante NDVI y Transectos – Invierno 2014**



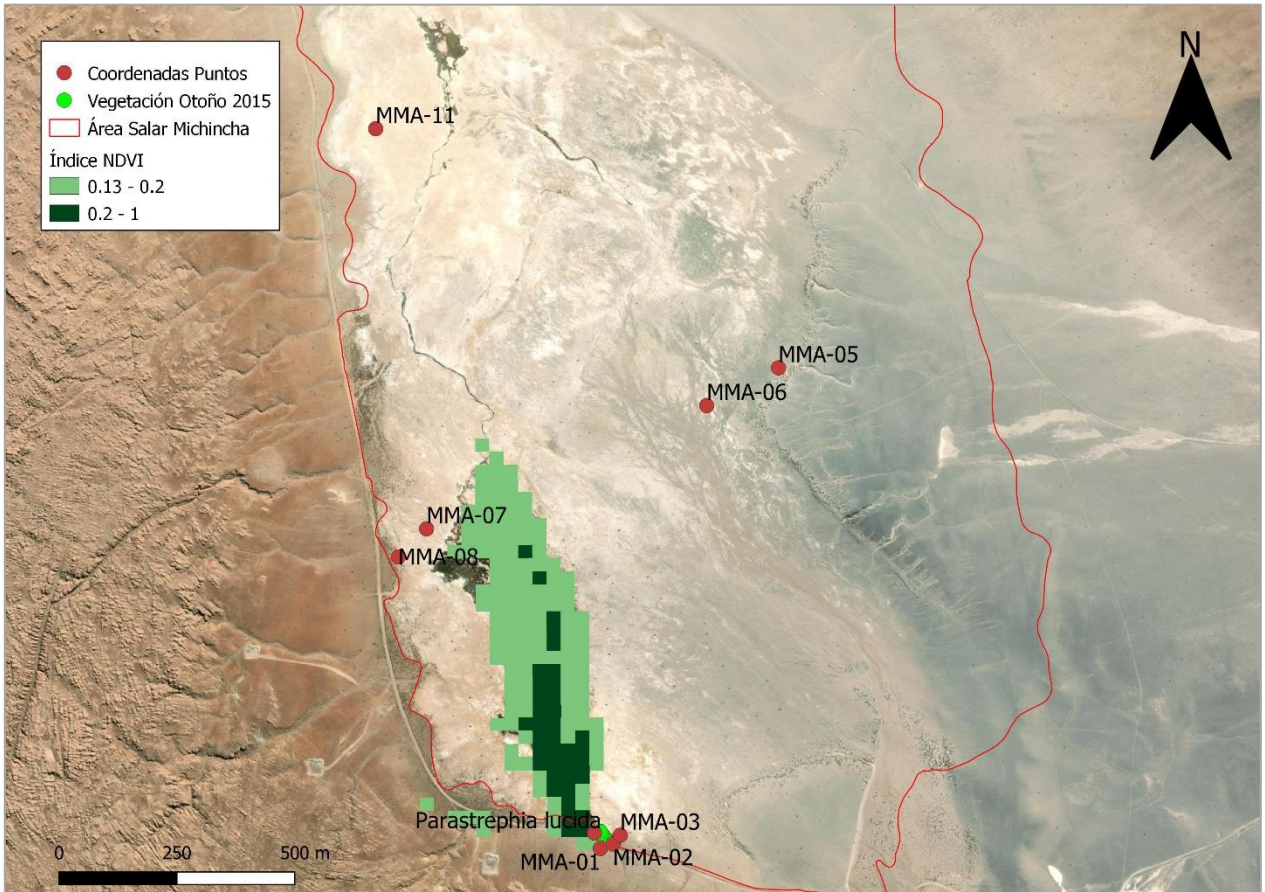
*Fuente: Elaboración Propia.*

**Figura 5-6: Comparación Áreas Mediante NDVI y Transectos – Verano 2015**



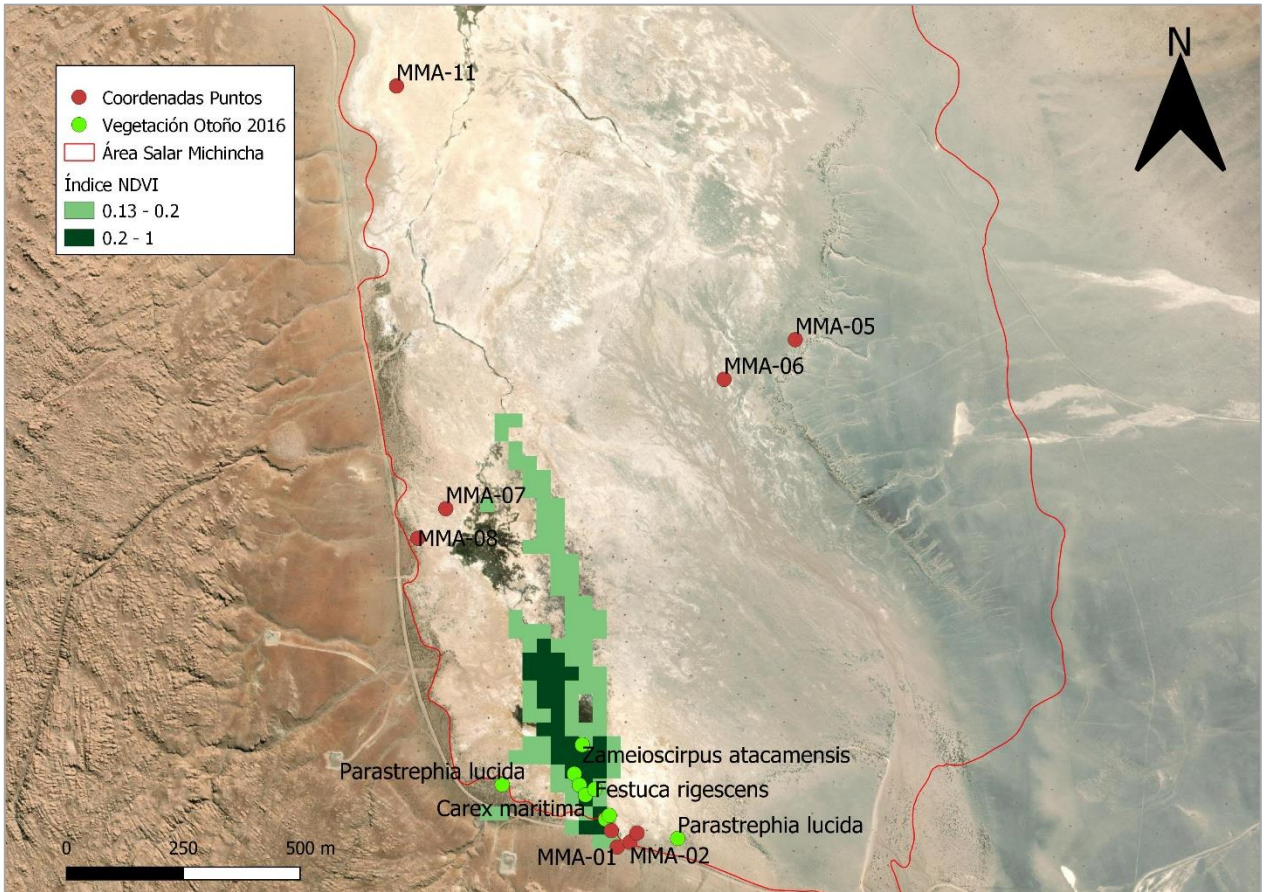
*Fuente: Elaboración Propia.*

**Figura 5-7: Comparación Áreas Mediante NDVI y Transectos – Otoño 2015**



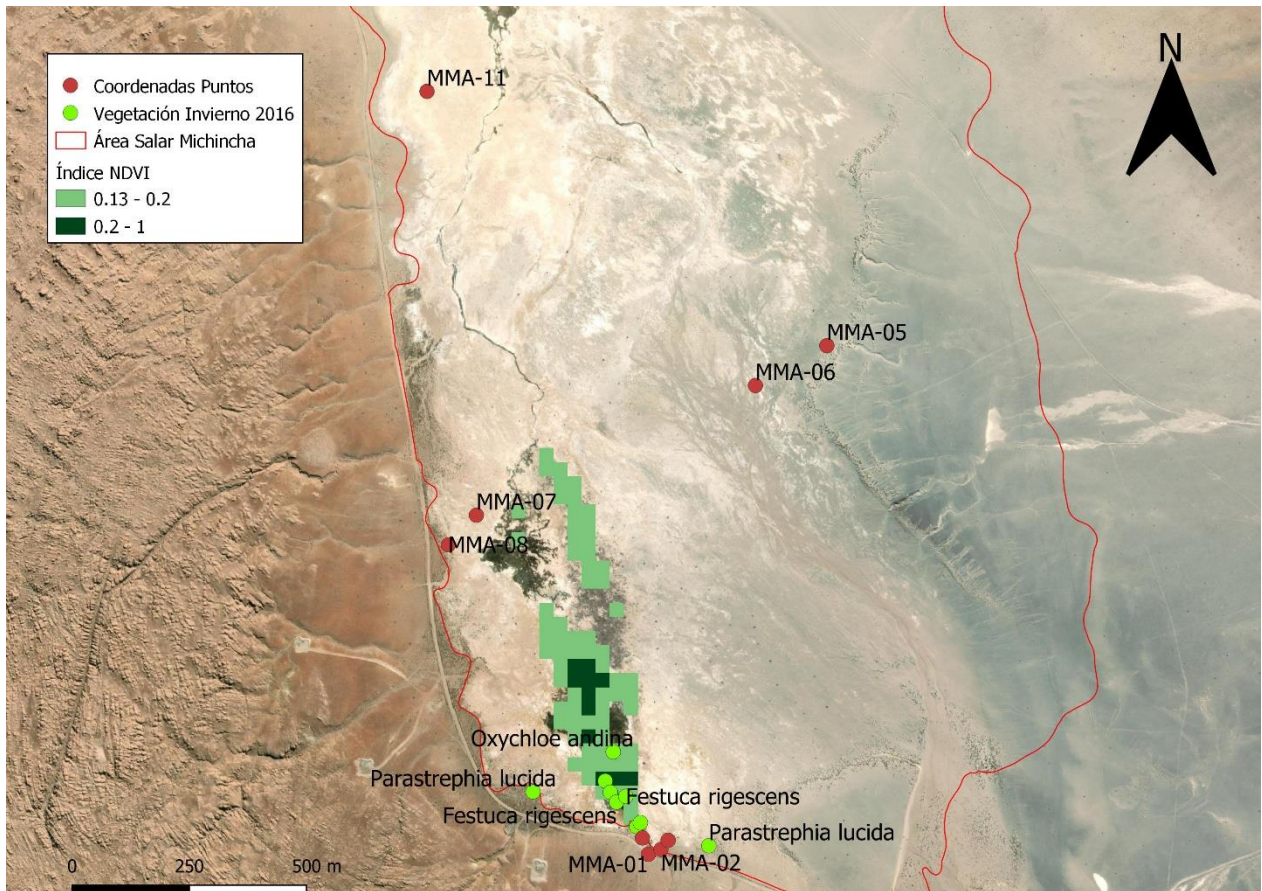
*Fuente: Elaboración Propia.*

**Figura 5-8: Comparación Áreas Mediante NDVI y Transectos – Otoño 2016**



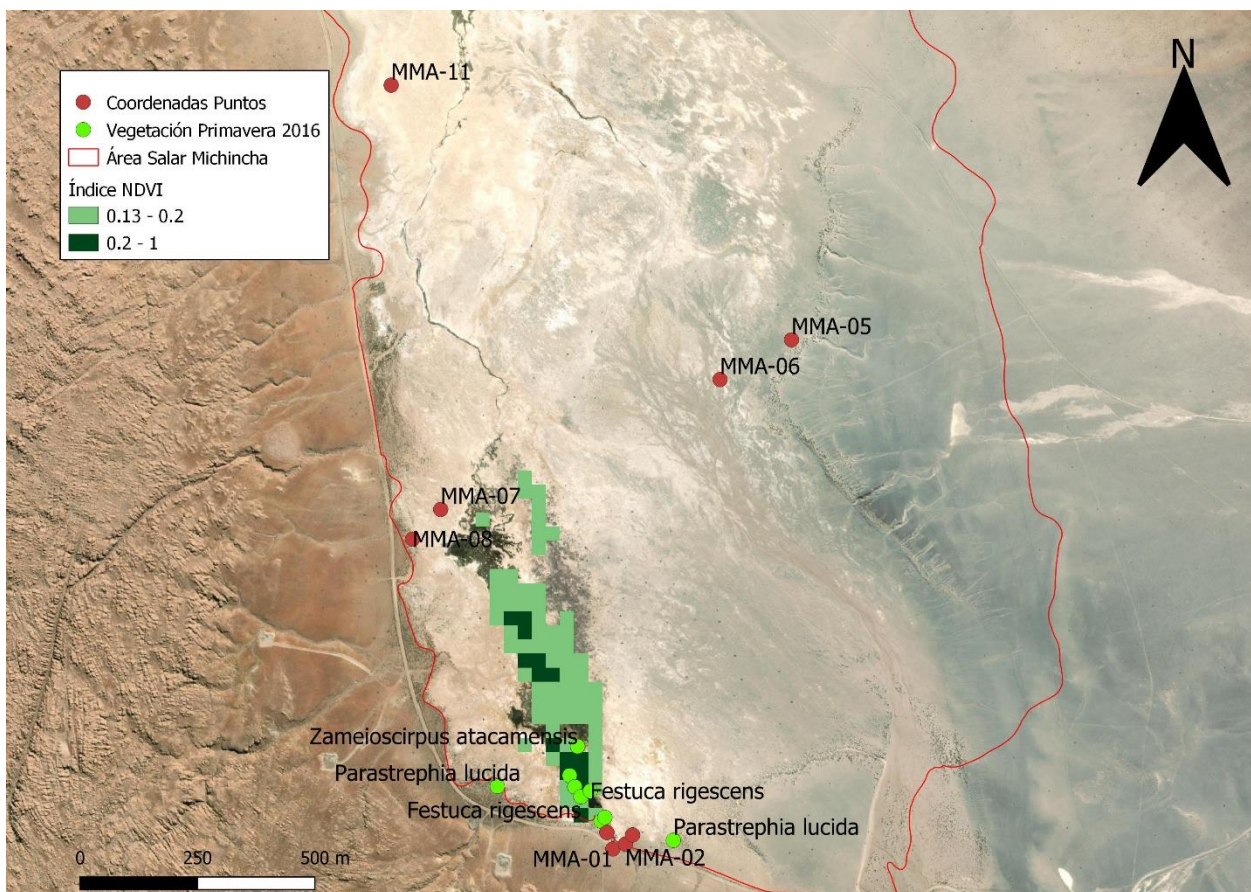
*Fuente: Elaboración Propia.*

**Figura 5-9: Comparación Áreas Mediante NDVI y Transectos – Invierno 2016**



*Fuente: Elaboración Propia.*

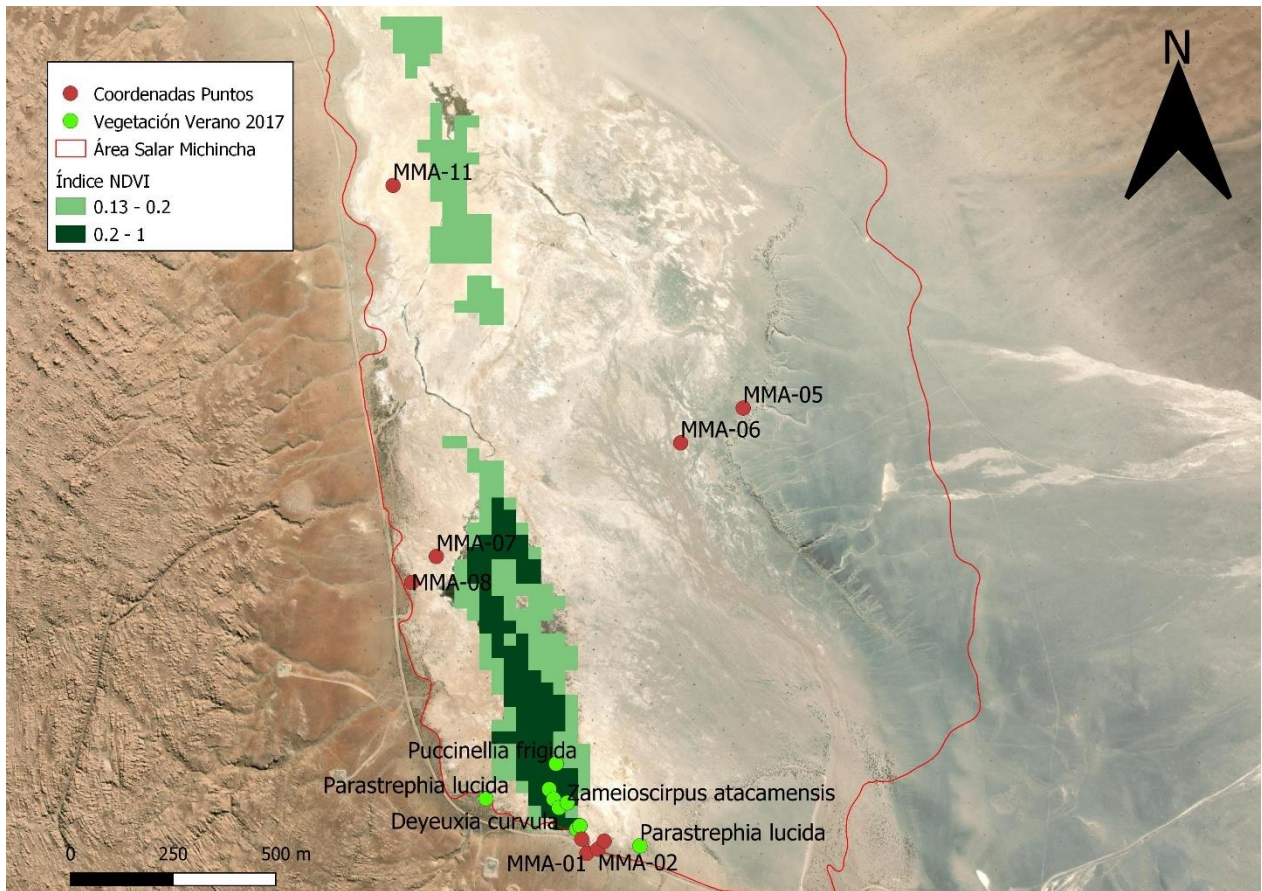
**Figura 5-10: Comparación Áreas Mediante NDVI y Transectos – Primavera 2016**



*Fuente: Elaboración Propia.*

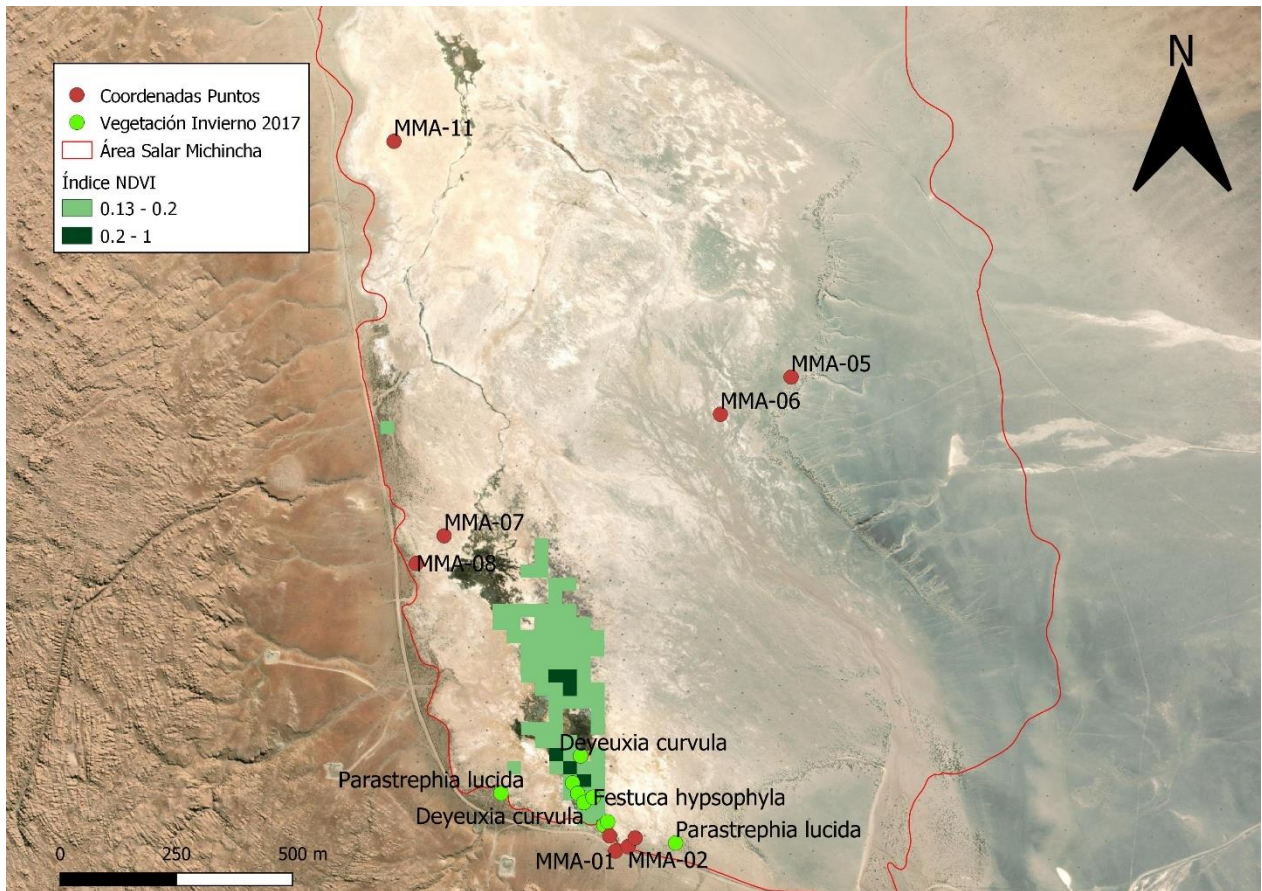


**Figura 5-11: Comparación Áreas Mediante NDVI y Transectos – Verano 2017**



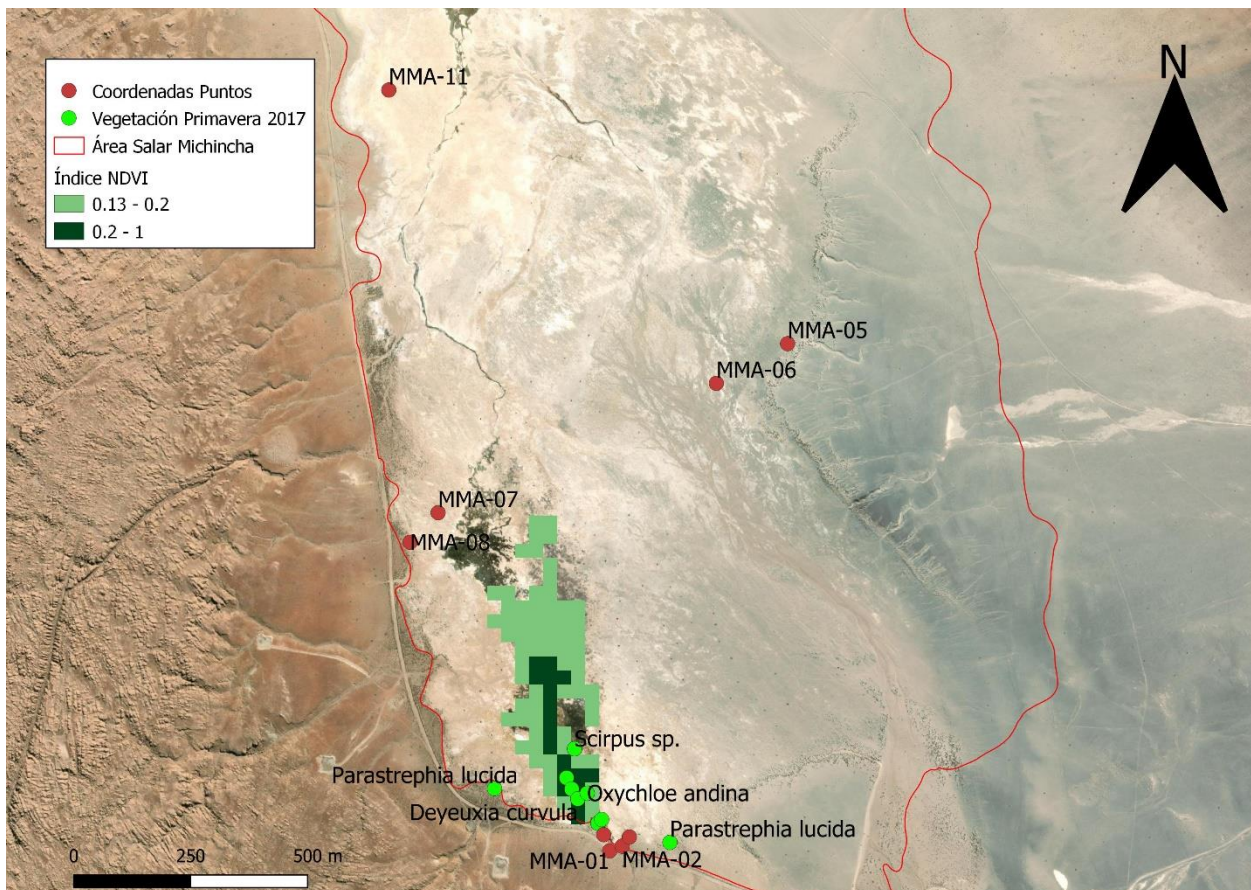
*Fuente: Elaboración Propia.*

**Figura 5-12: Comparación Áreas Mediante NDVI y Transectos – Invierno 2017**



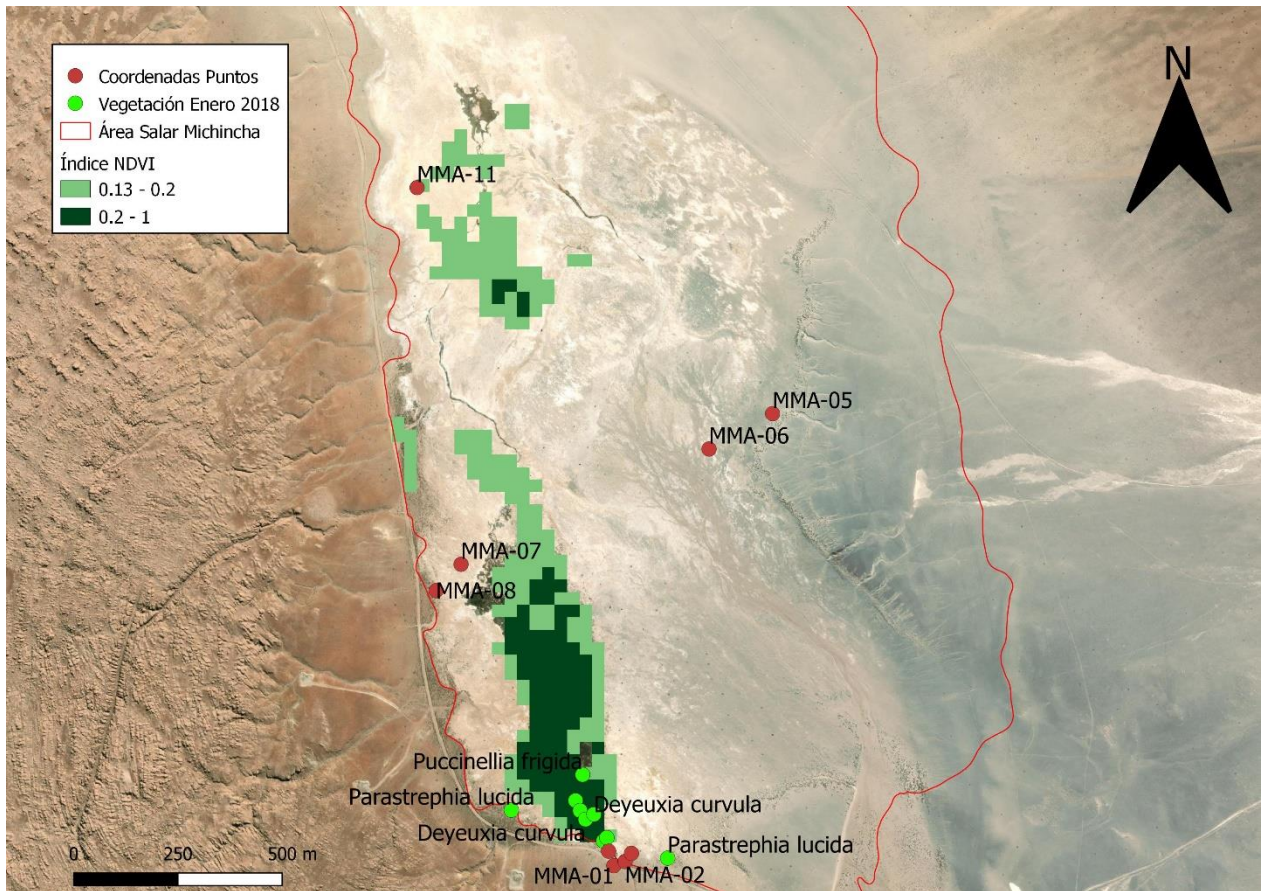
*Fuente: Elaboración Propia.*

**Figura 5-13: Comparación Áreas Mediante NDVI y Transectos – Primavera 2017**



*Fuente: Elaboración Propia.*

**Figura 5-14: Comparación Áreas Mediante NDVI y Transectos – Verano 2018**



*Fuente: Elaboración Propia.*

## 5.2 MODELO PREDICTIVO DEL ÁREA VEGETACIONAL A PARTIR DEL NIVEL FREÁTICO Y VARIABLES CLIMÁTICAS

### 5.2.1 Aspectos Generales

Como ya ha sido señalado, el objeto del presente trabajo es generar un modelo o estimador que permita proyectar las áreas de cobertura vegetal a partir de registros de variables hídricas o climáticas, a saber: nivel freático, precipitación, evaporación.

En el presente acápite, se detalla la elaboración del referido modelo o estimador: qué predictores se usarán y por qué; definiciones que se tomaron durante el trabajo para la generación del modelo; periodo y resultado de la calibración, entre otros. Por último, se aplicó el resultado a los niveles futuros proyectados a partir del modelo hidrogeológico de Collahuasi (ver acápite 2.3)

### 5.2.2 Elaboración Modelo Predictivo de Áreas Vegetacionales

La primera definición que se tomó para la elaboración del modelo predictivo fue la de qué tipo de regresión múltiple se utilizaría para el trabajo a desarrollar. Para esto, se tenían como opción diversos tipos de regresión (MLR, *Shrinkage*, Transformaciones, *Local Linear Regression*, entre otras) pero la que mejores resultados entregó fue la Regresión Lineal Múltiple (MLR por sus siglas en inglés) (ver acápite 2.2.3).

Si bien la Regresión Lineal Múltiple o MLR ya se mencionó en el acápite 2.2.3, en el presente acápite se detallará más en profundidad. Como ya mencionó anteriormente, la MLR consiste en generar un modelo lineal en el que el valor de la variable dependiente o respuesta ( $y$ ) se determina a partir de un conjunto de variables independientes llamadas predictores ( $x_1, x_2, x_3, \dots$ ). Los modelos lineales múltiples siguen la siguiente ecuación:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_{1i} + \beta_2 \cdot x_{2i} + \dots + \beta_n \cdot x_{ni} + \varepsilon_i$$

Donde  $\beta_0$  corresponde al valor de  $y$  cuando todos los predictores son cero;  $\beta_i$  el efecto promedio que tiene el incremento en una unidad de la variable predictora  $x_i$  sobre la variable dependiente y manteniéndose constantes el resto de las variables; por último,  $\varepsilon_i$  es el residuo o error, es decir, la diferencia entre el valor observado y el estimado por el modelo. Es importante tener en cuenta que la magnitud de cada coeficiente  $\beta$  depende de las unidades en las que se mida la variable predictora a la que corresponde, por lo que su magnitud no está asociada con la importancia de cada predictor.

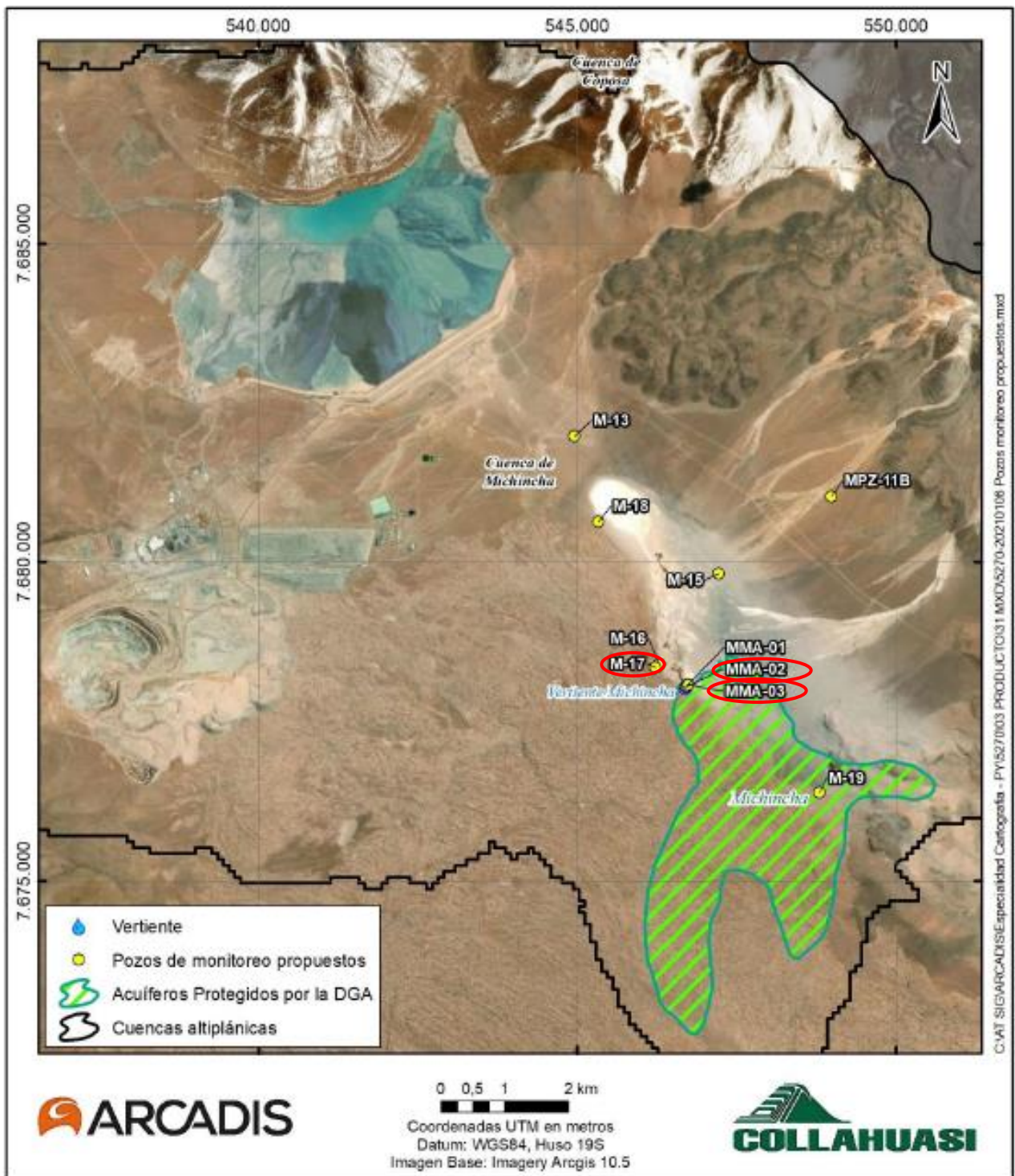
En el marco definido por las características de un modelo tipo MLR, se procedió a determinar qué parámetros podrían usarse para luego, a partir de ese grupo de parámetros definido previamente, determinar el set de predictores a usar. A priori, los parámetros que potencialmente podrían usarse son: profundidad del nivel freático (en pozos de interés cercanos al salar de Michincha), evaporación y precipitación. Las extracciones también podrían haberse usado, pero dada la alta correlación con los niveles y la afectación de los primeros sobre los últimos, se decidió dejarlas fuera.

Se definió usar de manera primordial la profundidad del nivel freático, dadas las características del modelo que se quiere elaborar, así como también por la potencial relación con la vegetación. Acá cabe señalar que en la cuenca de Michincha, lo que constituye una característica general de las cuencas endorreicas altoandinas, la vegetación depende, en primer lugar, de la profundidad del nivel freático, y luego de la precipitación y la evaporación. Esto constituye una característica general de las cuencas endorreicas altoandinas. En algún momento se tuvo como opción utilizar el promedio de los niveles en algunos pozos, pero en ese caso podía ocurrir que hubiera profundidades del nivel que pesaran más que otras, distorsionando los resultados. Dado lo anterior, se determinó usar directamente la profundidad del nivel freático en los pozos MMA-02, MMA-03 y M-17. Esto, por su ubicación, que captura los efectos tanto desde el sur como del oeste de la zona de vegetación en cuestión, así como también porque en la Adenda Extraordinaria (SGA, 2021) se señala que los puntos señalados forman parte del Plan de Seguimiento Ambiental del proyecto, por lo que se trata de puntos que se seguirán siendo medidos de manera regular, permitiendo contar con información para usos futuros del modelo (ver Figura 5-15). En esta figura puede verse también la definición de acuíferos protegidos por la DGA que se ubican al sur del salar de Michincha, mencionados también previamente en el acápite 4.1.3.

También se decidió usar la precipitación. Esto, dada la relación de esta tanto con los niveles (ver Figura 4-4 y Figura 4-5) como con la vegetación (ver Figura 5-3). La información de precipitación que se usó corresponde a la registrada en la estación Ujina, la cual se detalla en el acápite 4.1.2.3. Para la serie completa de la precipitación, ver la Figura 4-11.

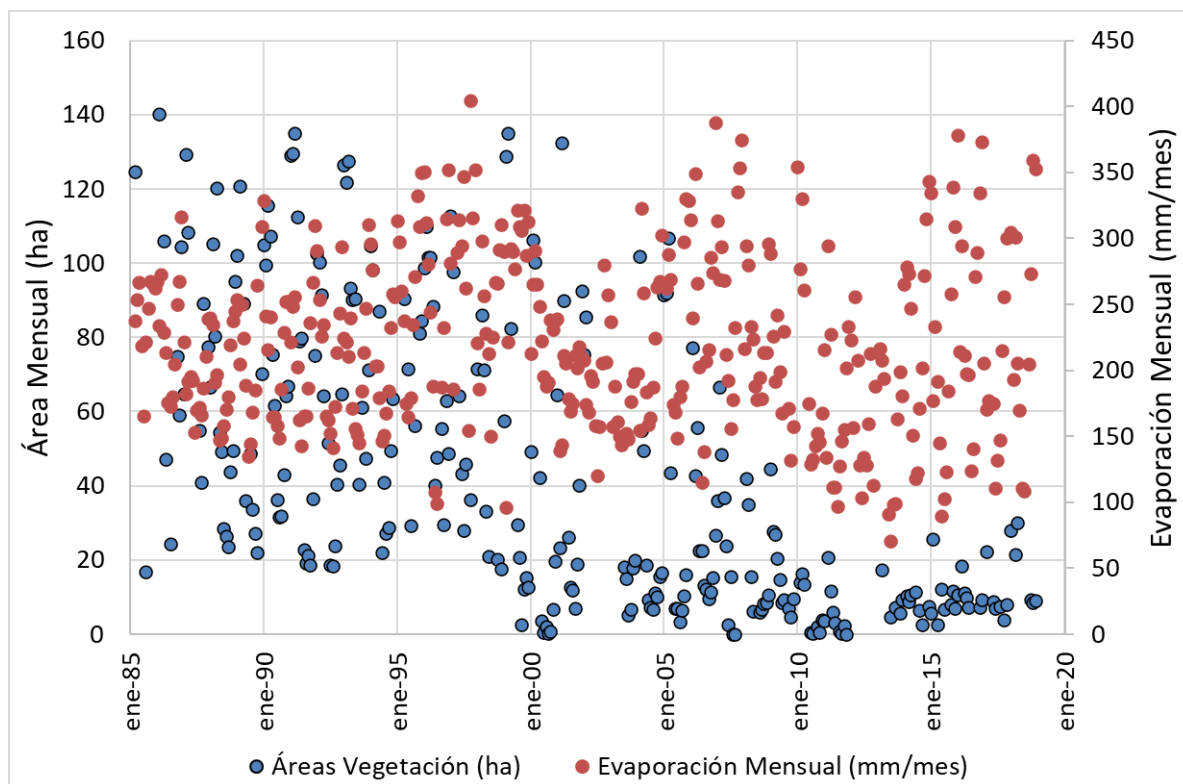
Se determinó no usar la evaporación (la que se mide en la estación Lequena (ver acápite 0), básicamente por dos razones. En primer lugar, sólo se contaba con información hasta diciembre de 2018 (lo que hubiera implicado rellenar información hasta 2021); y segundo, no se encontró una relación significativa entre la evaporación y las áreas de vegetación en el salar de Michincha, tal como puede verse en la Figura 5-16. Lo anterior probablemente se relaciona con lo referido en el acápite 4.2.1 correspondiente al balance hídrico, en cuanto a que en la situación actual la evaporación se considera nula dado que los niveles han descendido de tal forma que no son capaces de generar flujos de evaporación. En relación con lo anterior, es importante señalar que la vegetación que se está analizando se ubica en gran medida en el sur del Salar de Michincha, en las zonas cercanas adonde afloraba naturalmente la vertiente Michincha (y donde desde 2005 Collahuasi hace una reposición por 5 L/s que extrae de un pozo dedicado exclusivamente para ese propósito) y más al norte también. En este sector, las aguas provenientes desde el oeste y el sureste confluyen en el depocentro del salar, elevando los niveles y haciendo posible la aparición de vegetación, para luego comenzar a moverse hacia el norte, rumbo al salar de Coposa (ver acápite 4.1.2).

**Figura 5-15: Puntos de Monitoreo de Nivel de Agua Subterránea Propuestos en el Salar de Michincha (puntos para modelo resaltados en rojo)**



*Fuente: Arcadis, 2021.*

**Figura 5-16: Áreas de Vegetación en Salar de Michincha y Evaporación Mensuales**



*Fuente: Elaboración Propia.*

Lo último en cuanto a los criterios definidos de manera previa a la elaboración del modelo o predictor es en referencia a la época del año de la que se elegirán las imágenes satelitales con que se trabajará.

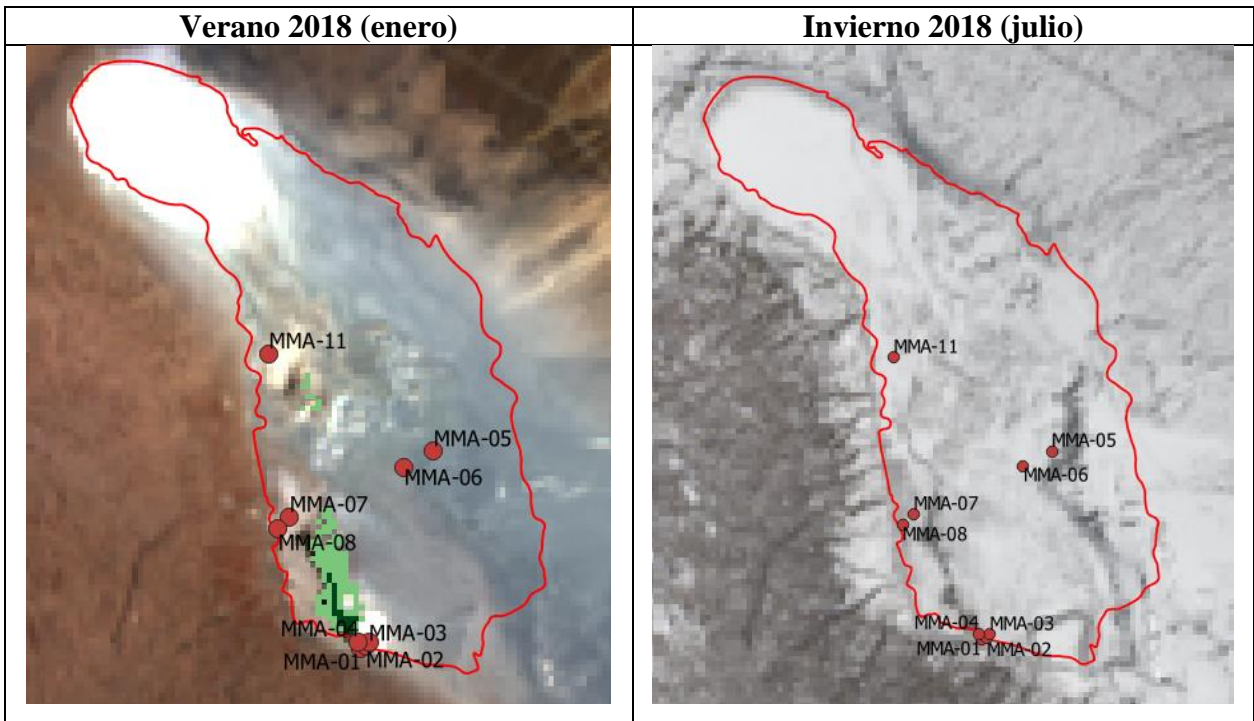
Dada la ubicación y las características del salar de Michincha, hay diferencias importantes entre los veranos y los inviernos. Para esto, se presenta la Tabla 5-5 con la comparación entre el verano e invierno de 2018 (se eligió solamente como ejemplo ese año), en imágenes Landsat con color verdadero, a las que se agregó también las áreas de cobertura según el índice NDVI antes detallado. Ahí puede observarse la situación radicalmente distinta entre ambas épocas. Mientras en verano se observa una condición del suelo despejada y que permite analizar la cobertura vegetal, en invierno se tiene, la mayoría de las veces, una cobertura de nieve casi completa en el salar, por lo que la vegetación queda cubierta y, posiblemente, en un grado de vigor mínimo. Así, la utilidad del indicador se reduce, pues no está pensado para funcionar en estas condiciones.

Esto se muestra como ejemplo de las dificultades que presenta el salar en invierno, ya que la caída de nieve en esa época genera distorsiones en las coberturas de vegetación. Esto se refuerza al observar el comportamiento estacional de la temperatura. En la estación Ujina el registro de temperatura es muy corto y disperso en el tiempo, por lo que en la Figura 5-17 se presenta la variación estacional de la temperatura en la estación Coyacagua (que, como ya se mencionó, se ubica a una altura similar a la de Ujina), la cual posee un registro más extenso (casi 15 años, entre



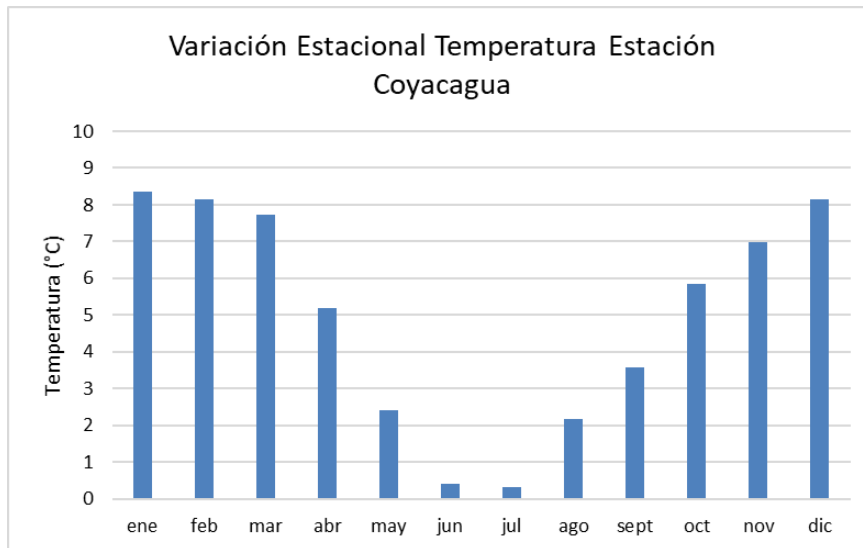
1980 y 1994). Ahí pueden observarse las bajas temperaturas para la época de invierno, en particular junio y julio cuando la temperatura promedio llega a estar muy poco por encima de 0°C.

**Tabla 5-5: Comparación Verano e Invierno de 2018 (Color Verdadero)**



*Fuente: Elaboración Propia.*

**Figura 5-17: Variación Estacional de la Temperatura - Estación Coyacagua**



*Fuente: Elaboración Propia.*

Por lo anterior, se decide trabajar sólo con las áreas máximas de verano para la elaboración del modelo. Esto además permite establecer un criterio conservador con respecto a las áreas, ya que,

al estar trabajando con los máximos, se está analizando el mejor escenario posible para la vegetación de cada año (para el funcionamiento del sistema, ver acápite 5.1.1).

Tomadas todas las definiciones anteriores, se procedió a la elaboración del modelo o estimador. Este trabajo se realizó en la plataforma R Studio, la cual provee herramientas gratuitas y de código libre para el trabajo con el código R.

Se buscó el área máxima para el periodo de verano para cada año entre 1985 y 2018. Dado que para cada área máxima se requiere contar también con información de niveles en los pozos M-17, MMA-02 y MMA-03 para el mes respectivo (en que se obtiene el área máxima), dentro del periodo de 34 años referido hay años que no se pueden utilizar por no contar alguno de los elementos de la información requerida. Así, en la Tabla 5-6 se presentan los 26 años que finalmente se utilizaron:

**Tabla 5-6: Años a Usar para Elaboración del Modelo**

1985	1998	2006	2014
1987	1999	2007	2015
1988	2000	2008	2016
1989	2001	2009	2017
1993	2002	2010	2018
1994	2004	2011	
1995	2005	2013	

*Fuente: Elaboración Propia.*

El proceso de calibración se realizó con la información de los años 1985-2018, y la validación se realizó con los años 2019-2021.

Como ya se explicó anteriormente, se realizó una Regresión Lineal Múltiple (MLR), que entregó como resultado la siguiente ecuación. Cabe mencionar que los niveles corresponden a la profundidad del nivel freático medida en metros, y la precipitación usada corresponde a la del mes en cuestión, medida en mm. El área estimada tiene unidades de hectárea. Se observa también que hay variables que suman área (signo positivo) y otras que restan (signo negativo), pero esto no tiene en si mismo un sentido físico, ya que se trata de valores obtenidos a partir de una regresión que se propone ajustar estadísticamente de la mejor manera posible los distintos parámetros para la estimación de las áreas de cobertura vegetal.

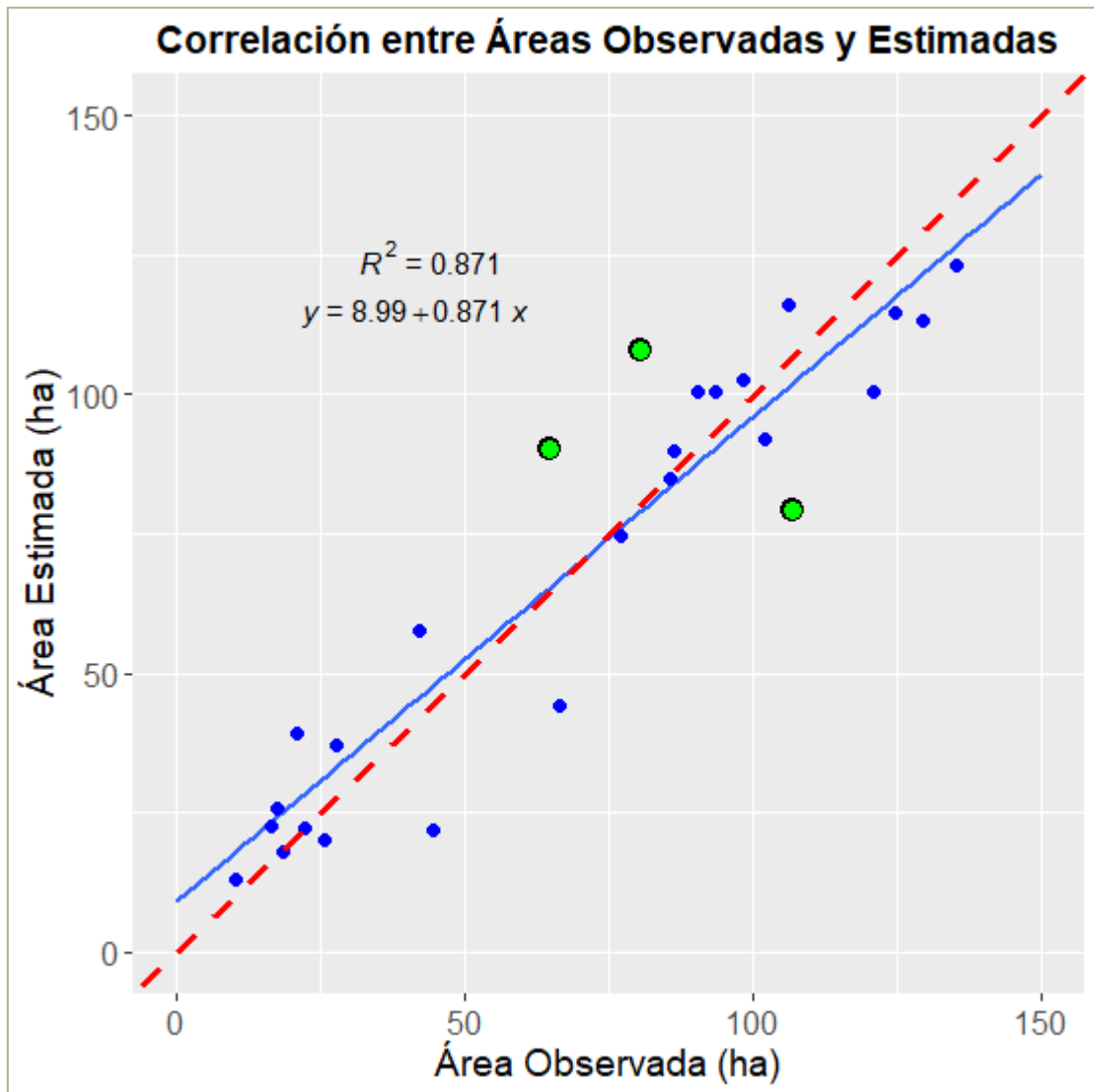
$$\begin{aligned}
 \text{Área Máxima Verano}_i & \\
 &= 176,7 + 23,24 * \text{Nivel MMA02}_i - 3,13 * \text{Nivel MMA03}_i - 49,53 * \text{NivelM17}_i \\
 &- 0,0001 * Pp_i
 \end{aligned}$$

Esto, con un  $R^2$  igual a 0,871 y un  $R^2$  Ajustado igual a 0,847.

En primer lugar, se grafica la correlación entre áreas observadas y estimadas, lo que se presenta en la Figura 5-18. Se marcan en verde los potenciales *outlier*, Estos corresponden a los que más se

alejan de la línea con pendiente igual a 45° (color rojo punteado), es decir, los que más se alejan de la recta cerca de la cual deberían ubicarse los puntos para tener un modelo que represente mejor los valores observados. El valor de corte que se tomó para definirlo como *outlier* fue que la diferencia entre valores estimados y observados fuera mayor a 30 ha.

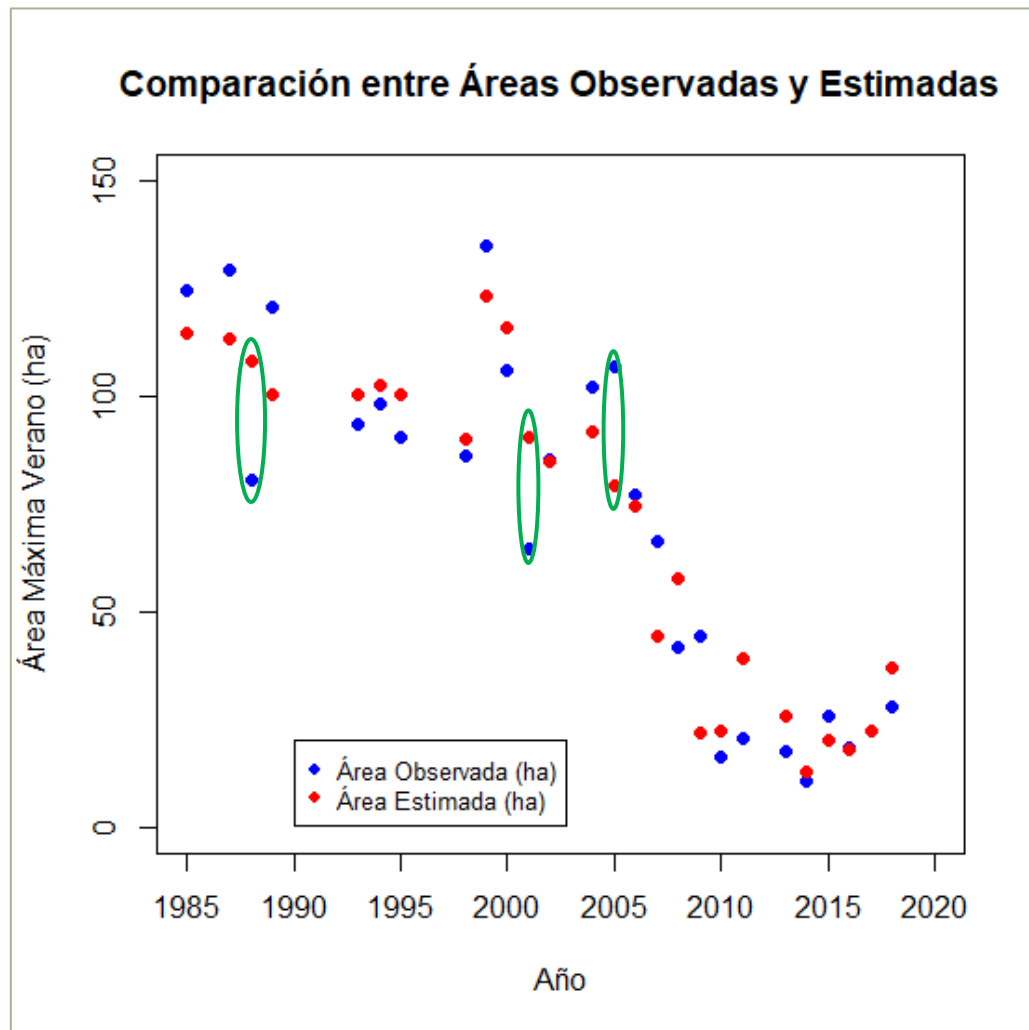
**Figura 5-18: Gráfico de Correlación entre Áreas Observadas y Estimadas Periodo 1985 - 2018 (en verde se marcan potenciales outlier)**



*Fuente: Elaboración Propia.*

Gráficamente, la comparación entre áreas estimadas y observadas se presenta en la Figura 5-19, en la cual también se marcan en verde las mayores diferencias como potenciales *outlier*. Acá cabe recalcar que las áreas observadas en realidad también corresponden a un modelo (que en ese caso consiste en estimar las áreas a partir de la aplicación del índice NDVI a imágenes satelitales Landsat).

Figura 5-19: Comparación entre Áreas Observadas y Estimadas Periodo 1985 - 2018 (en verde se marcan potenciales outlier)



Fuente: Elaboración Propia.

Luego, se realiza el chequeo para ver si se cumple con la condición de variabilidad constante de los residuos u homocedasticidad. Para esto, se aplica el test de Breusch-Pagan (típicamente utilizado para comprobar o no la homocedasticidad), lo cual se implementa en R. Este test consiste en la refutación o no de la hipótesis nula siguiente: la varianza de los residuos es constante. Si se tiene un  $p$ -valor menor a 0,05, se refuta la hipótesis nula y se tiene que no se cumple la condición de homocedasticidad. Por otro lado, si el  $p$ -value que se obtiene como resultado de la aplicación del test es mayor a 0,05, luego no se puede rechazar la hipótesis nula, y en consecuencia sí se cumple la condición de homocedasticidad.

El resultado obtenido a partir de la aplicación del test en R es un  $p$ -value igual a 0,76, por lo cual se falla en rechazar la hipótesis nula. Así, se tiene que el supuesto de homocedasticidad es aceptable, lo que equivale a señalar que los residuos cumplen con tal condición.

Se procede a hacer el ejercicio de eliminar los *outlier* identificados para ver cuánto mejora el RMSE (*Root Mean Square Error*, o Raíz del Error Cuadrático Medio), una medición frecuentemente usada para la estimación de las diferencias entre los valores estimados por un modelo o estimador, y aquellos valores observados. El valor del RMSE para el modelo original (sin eliminar valores *outlier*) es igual a 14,3 ha.

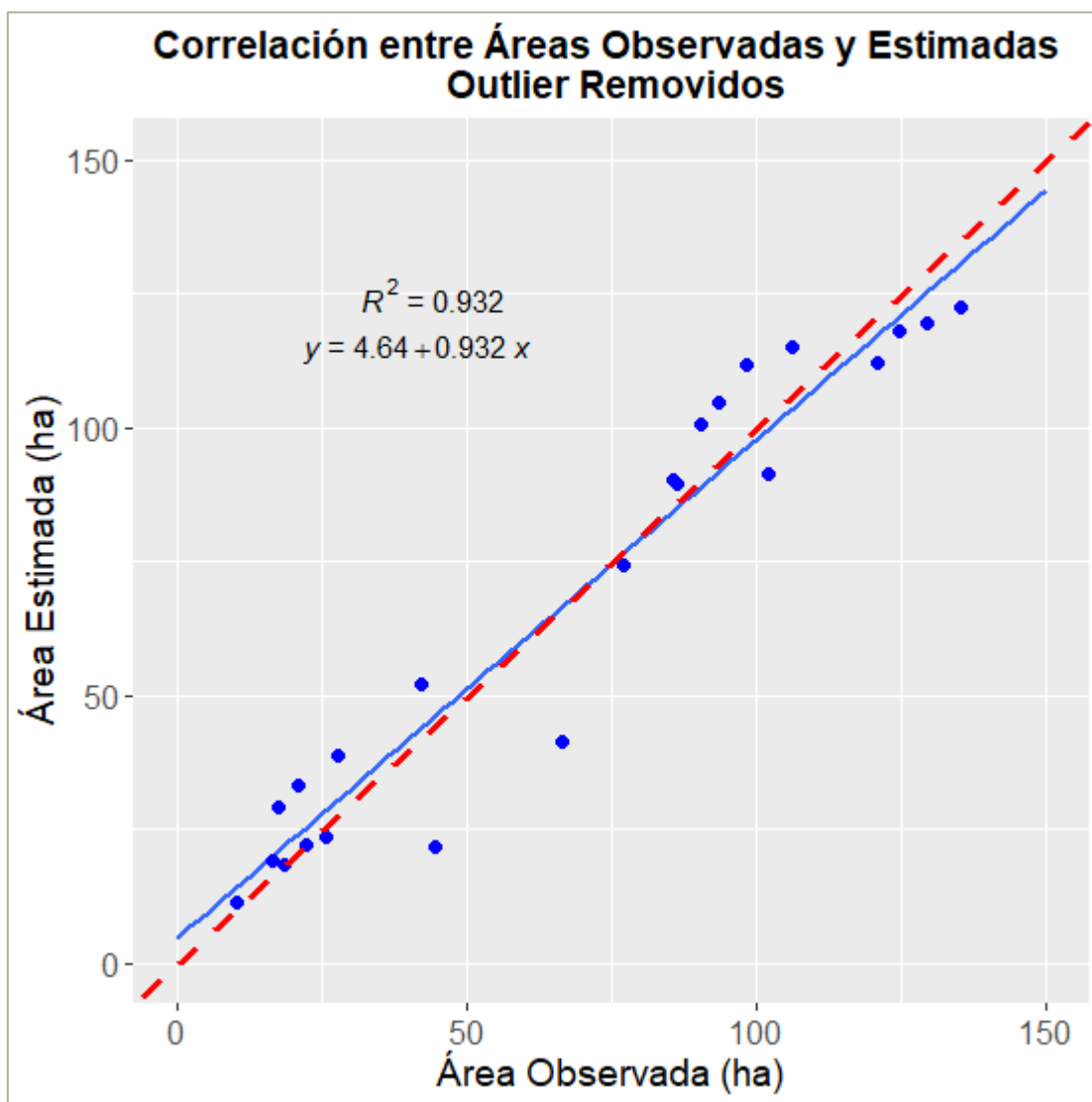
El resultado de la Regresión eliminando los valores *outlier* entrega la siguiente ecuación (nuevamente, los niveles corresponden a la profundidad del nivel freático medida en metros, la precipitación usada corresponde a la del mes en cuestión y está en mm, y el área estimada tiene unidades de hectárea):

$$\begin{aligned} \text{Área Máxima Verano}_i & \\ &= 167,96 + 14,63 * \text{Nivel MMA02}_i - 5,04 * \text{Nivel MMA03}_i - 37,54 * \text{NivelM17}_i \\ &+ 0,1331 * Pp_i \end{aligned}$$

En este caso, se tiene un  $R^2$  igual a 0,932 y un  $R^2$  Ajustado igual a 0,917, es decir, el modelo explica más de un 90% de la varianza. Además, en este caso se tiene un RMSE igual a 10,9 ha, lo que implica una reducción de casi un 24% en el RMSE.

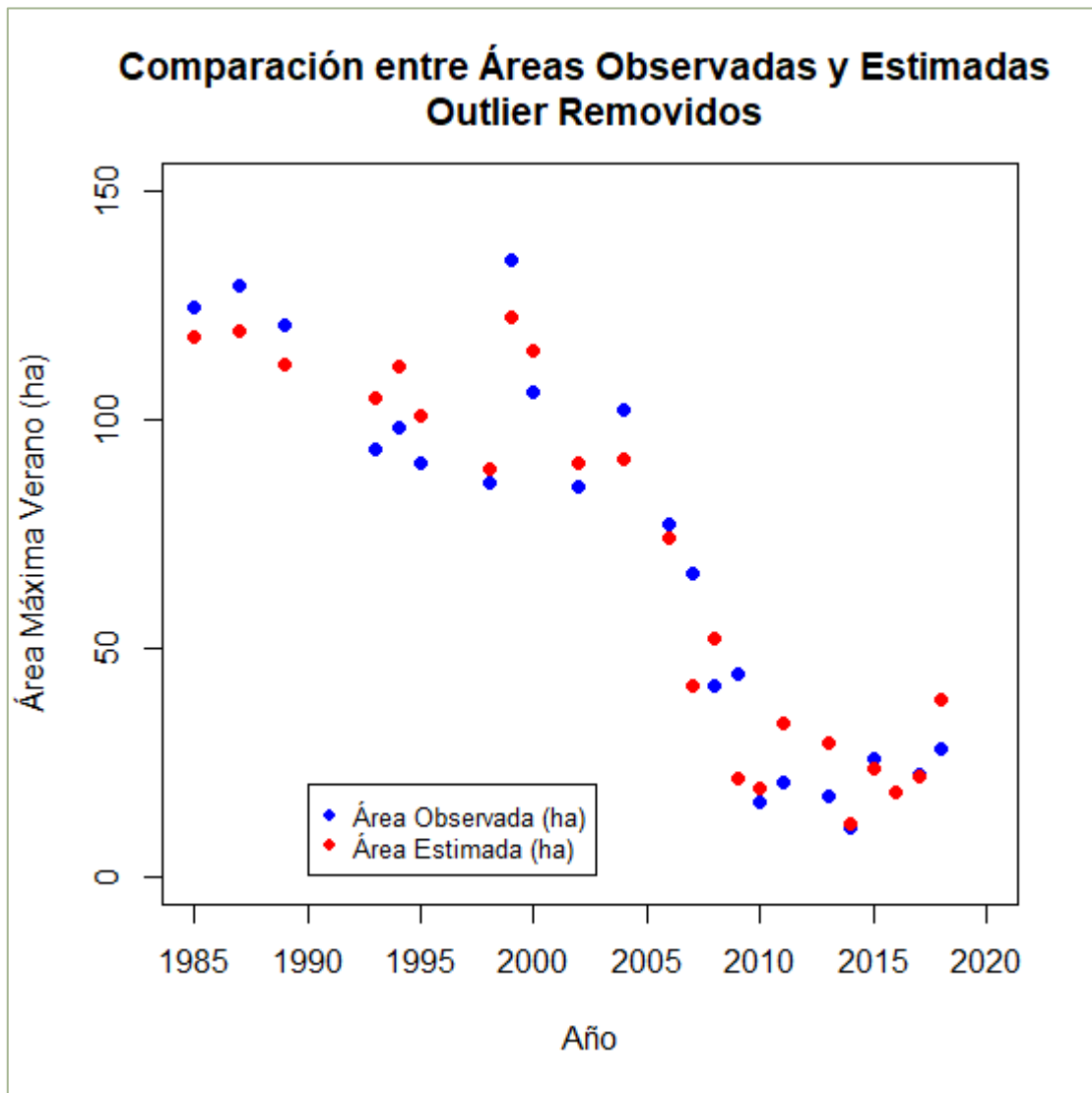
Posteriormente, en la Figura 5-20 se presenta la correlación entre áreas observadas y estimadas habiendo removido los *outlier*, en tanto en la Figura 5-21 se muestra la comparación entre áreas observadas y estimadas removiendo los valores *outlier*.

Figura 5-20: Gráfico de Correlación entre Áreas Observadas y Estimadas Periodo 1985 - 2018 – Outlier Removidos



Fuente: Elaboración Propia.

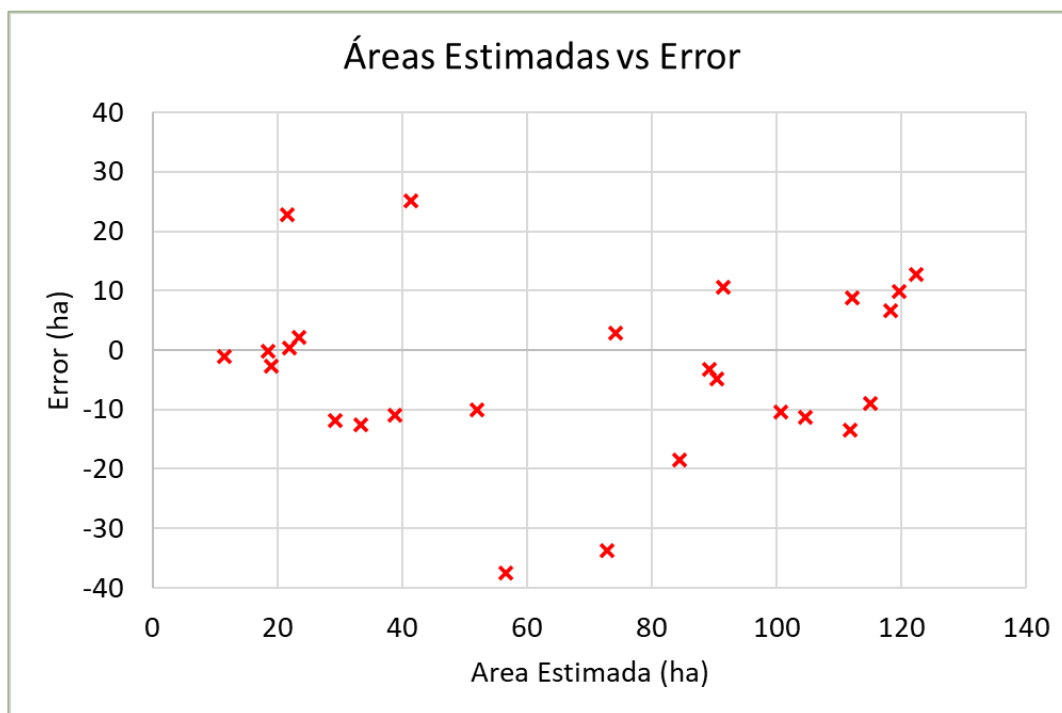
**Figura 5-21: Comparación entre Áreas Observadas y Estimadas Periodo 1985 - 2018 – Outlier Removidos**



*Fuente: Elaboración Propia.*

En fin, se realiza el chequeo de la distribución de los errores. El gráfico de áreas estimadas versus el error de la estimación se muestra en la Figura 5-22. Tal como se ve en la imagen, los errores no presentan ningún patrón no aleatorio y se distribuyen en torno a 0, por lo que los errores de las estimaciones no presentan un sesgo considerable. A lo anterior, se agrega el cálculo del RMSE normalizado (NRMSE, se normaliza con el rango de área observada máxima y mínima), error promedio y mediana del error, los cuales se presentan en la Tabla 5-7.

**Figura 5-22: Distribución Áreas Estimadas vs Error de Estimación**



*Fuente: Elaboración Propia.*

**Tabla 5-7: Error RMSE Normalizado, Promedio y Mediana del Error de Estimación del Modelo**

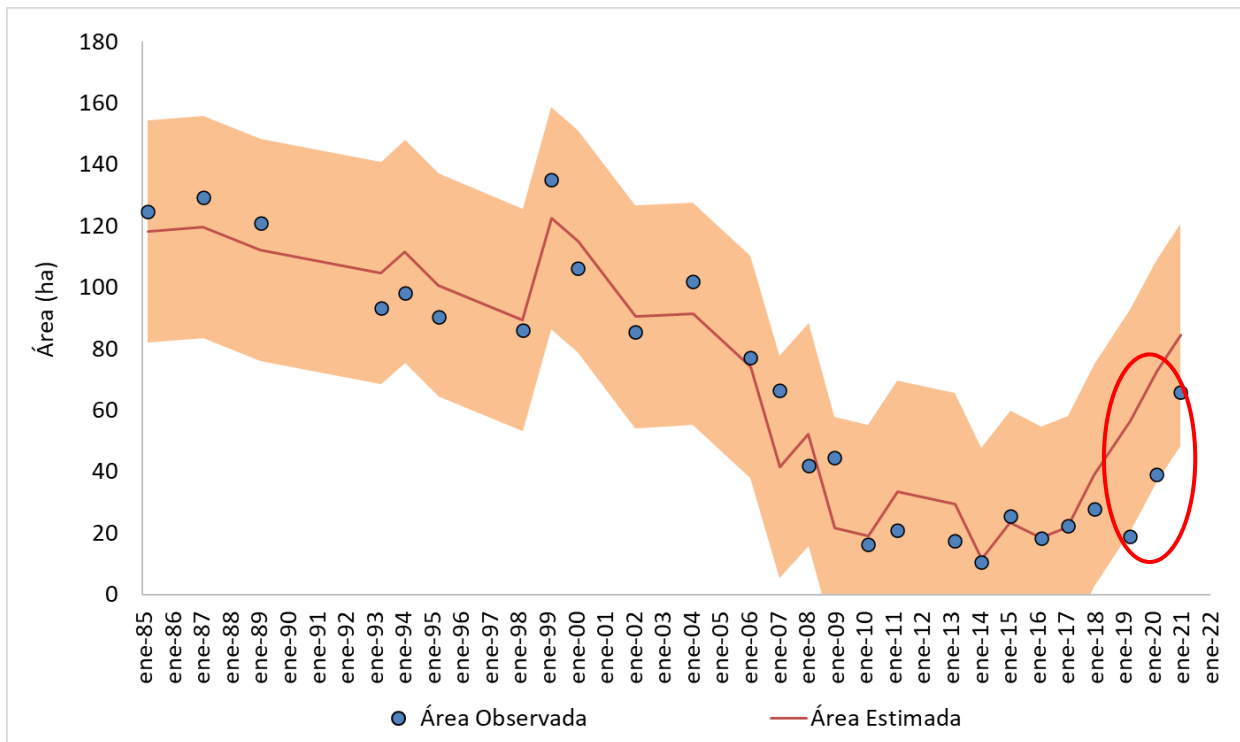
Error Normalizado	
NRMSE rango $y_{\max} - y_{\min}$	8,7%
<b>Promedio del Error (ha)</b>	<b>Mediana del Error (ha)</b>
11,25	10,24

*Fuente: Elaboración Propia.*

Como se señaló al comienzo, la calibración se hizo para el periodo 1985-2018. La validación del modelo o estimador se realizó con la información de los años 2019, 2020 y 2021, de manera de ver si es capaz de reproducir correctamente las áreas correspondientes a los máximos de verano de esos años. La comparación para todos los años, incluyendo estos últimos 3 (los que se remarcan en color rojo), se muestra en la Figura 5-23. En esta se agregaron las áreas observadas como puntos y las áreas estimadas como línea con una banda de ancho igual al percentil 95 del error de estimación. Esto quiere decir que dentro de esa banda se encuentran valores dentro de un rango de  $\pm 95\%$  del error de estimación. Ahí se puede ver que, si bien con diferencias entre áreas observadas y estimadas, el modelo reproduce correctamente la tendencia que tienen las áreas observadas estos últimos 3 años.



**Figura 5-23: Comparación entre Áreas Observadas y Estimadas con Banda de Ancho  $\pm$  Percentil 95, Periodo 1985 – 2021 (años 2019, 2020 y 2021 remarcados en rojo)**

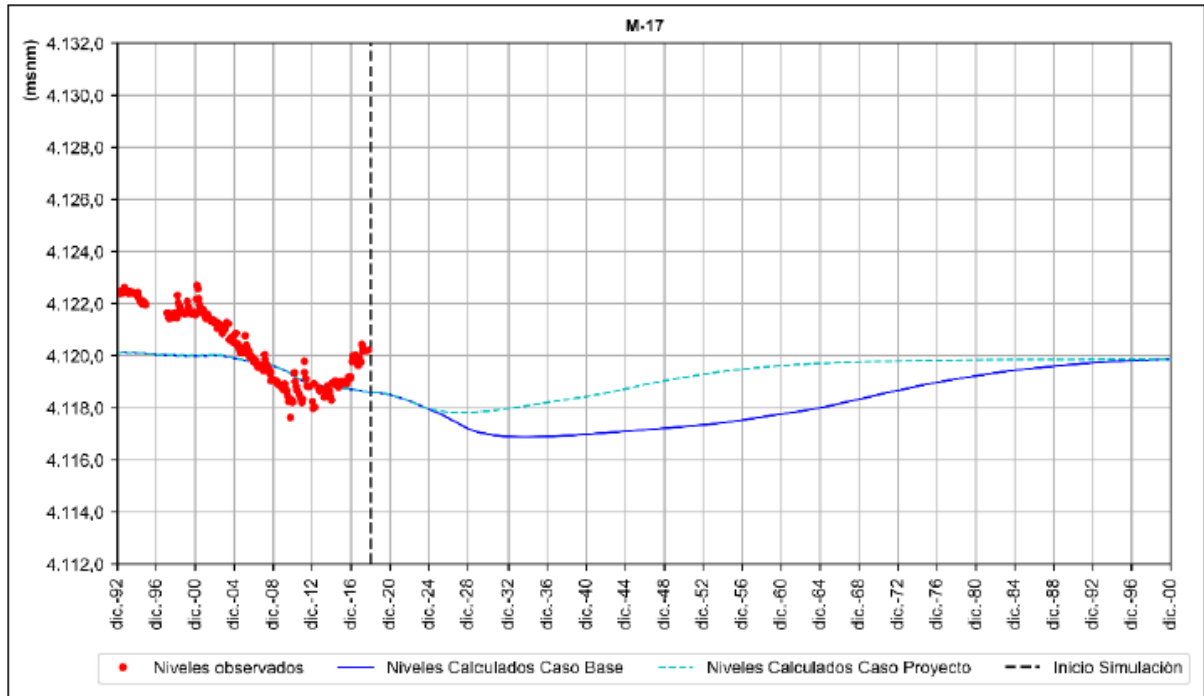


*Fuente: Elaboración Propia.*

### 5.2.3 Aplicación del Modelo a Escenarios Futuros del Modelo Hidrogeológico

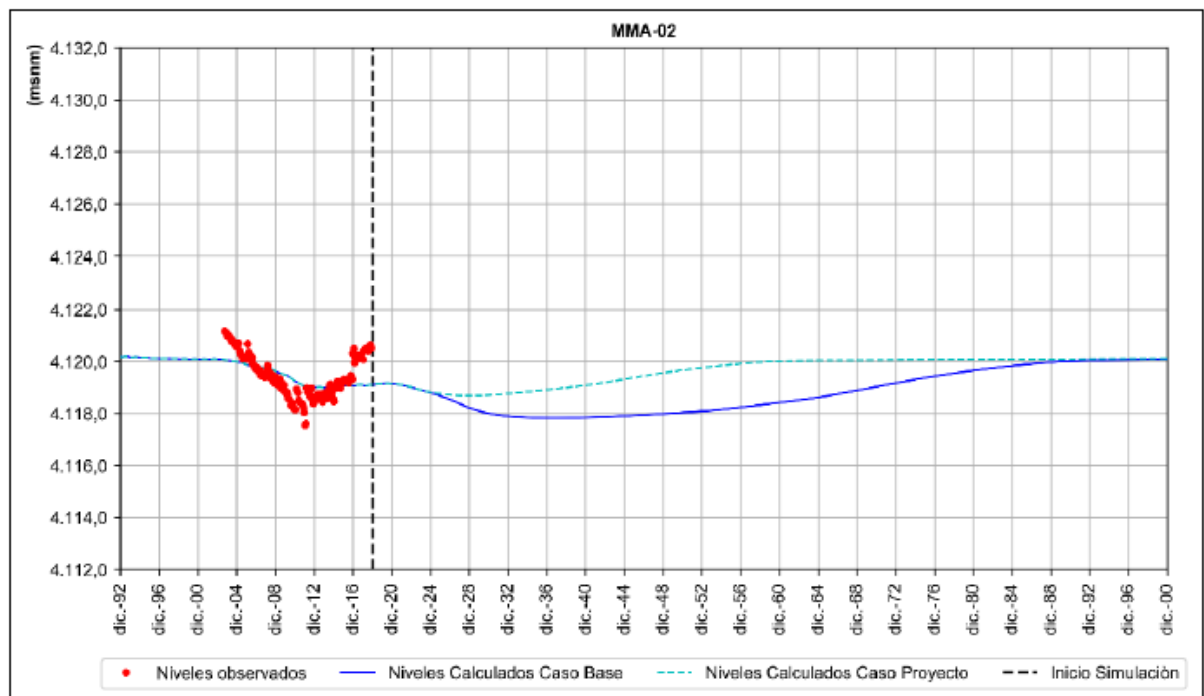
Se obtuvieron los niveles estimados en el Modelo Hidrogeológico presentado por Collahuasi en su EIA de 2018 para los pozos utilizados para la estimación de áreas (MMA-02, MMA-03 y M-17). Esto se hizo directamente a partir de los gráficos presentados en la Adenda del proyecto (diciembre de 2019, páginas 870 y 871). Esto se hizo así ya que no se contaba con tablas que mostraran directamente los valores en cuestión. Los gráficos entregados en este documento se presentan en la Figura 5-24, Figura 5-25 y Figura 5-26. Dado que los resultados anteriores se encuentran en cota, se hizo el cálculo para obtener la profundidad del nivel freático usando la cota de referencia de cada pozo informada por Collahuasi también. El resultado obtenido de los niveles para los pozos antes mencionados se presenta en la Figura 5-27. Al momento de la elaboración del presente trabajo se contó con más información que el que había a la fecha del EIA (diciembre 2018), por lo que en la Figura 5-27 se traslapan algunos datos con el inicio de los datos de la modelación, los cuales se agregan a partir de diciembre 2020. Como ya se señaló, los datos se rescataron a partir de los gráficos antes referidos, lo cual se hizo para el mes de diciembre de cada año, el cual está marcado en el eje x, de manera de simplificar este trabajo, lo que implica asumir que el dato de ese mes será el representativo del verano correspondiente. Los gráficos generados para cada pozo y situación se presentan en el Anexo B de este documento.

**Figura 5-24: Pozo M-17. Datos Observados y Proyección Situación Con y Sin Proyecto**



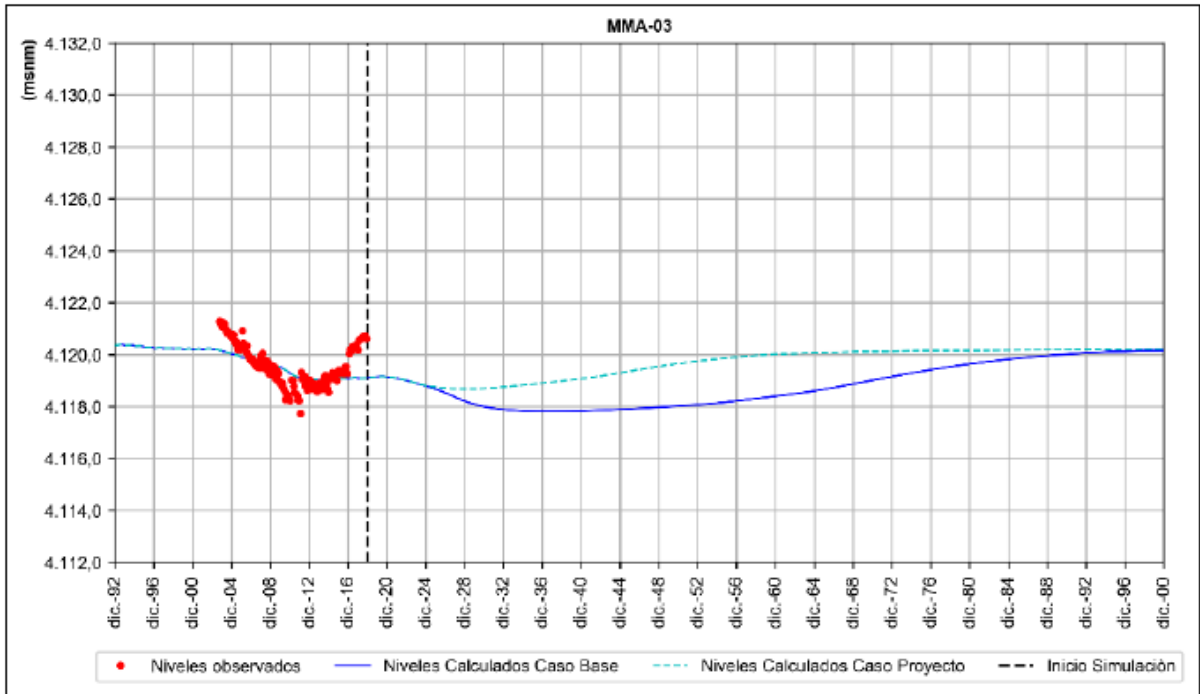
*Fuente: SGA, 2019.*

**Figura 5-25: Pozo MMA-02. Datos Observados y Proyección Situación Con y Sin Proyecto**



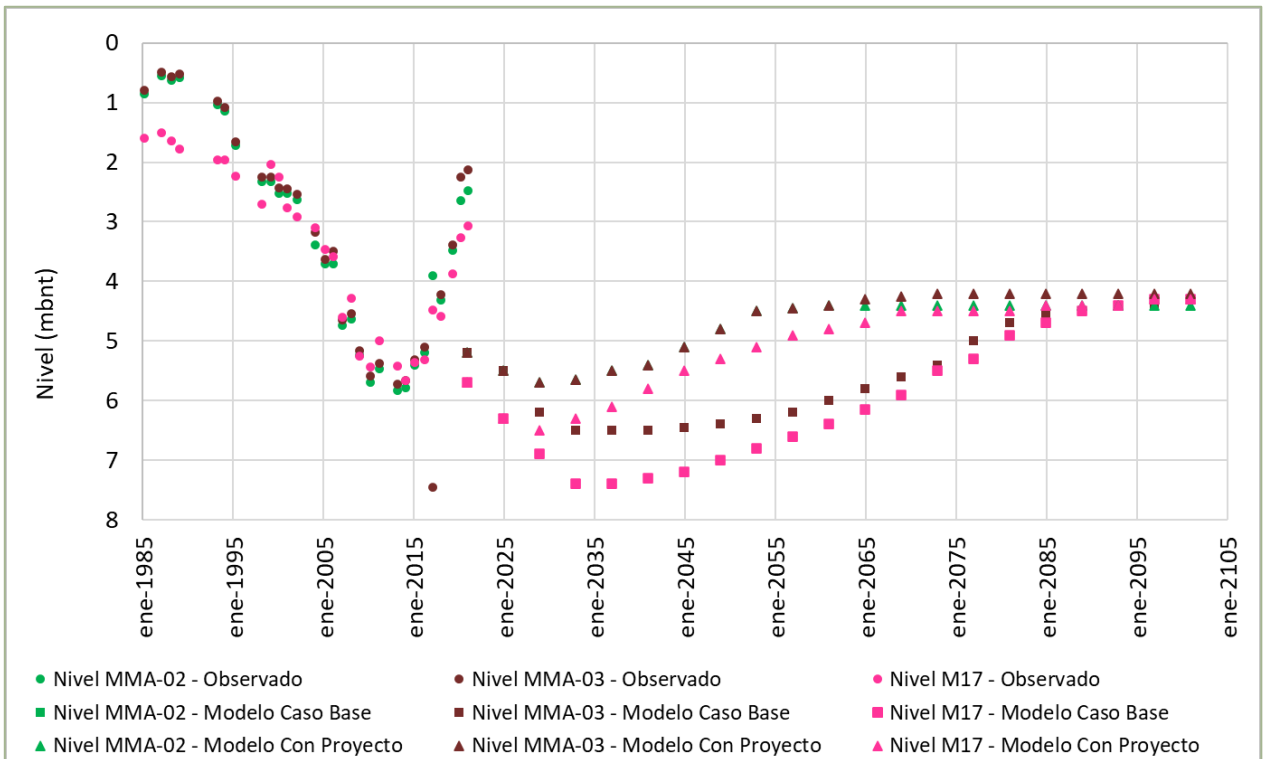
*Fuente: SGA, 2019.*

**Figura 5-26: Pozo MMA-03. Datos Observados y Proyección Situación Con y Sin Proyecto**



*Fuente: SGA, 2019.*

**Figura 5-27: Profundidad Niveles Pozos M-17, MMA-02 y MMA-03. Datos Observados, Proyectados Caso Base y Situación con Proyecto**

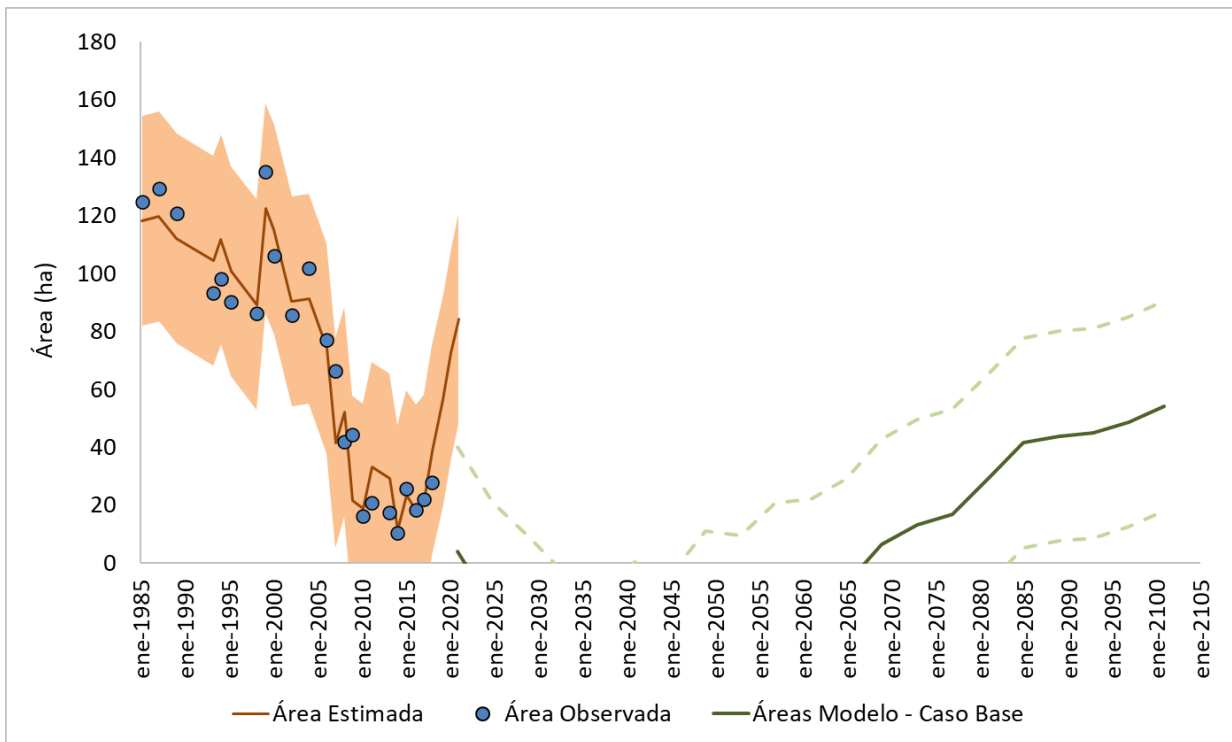


*Fuente: Elaboración Propia.*

Asimismo, para la estimación de la precipitación futura lo que se realizó fue que para cada diciembre ésta se calcula como un valor aleatorio entre los 26 registros de precipitación correspondientes a los veranos usados para la calibración.

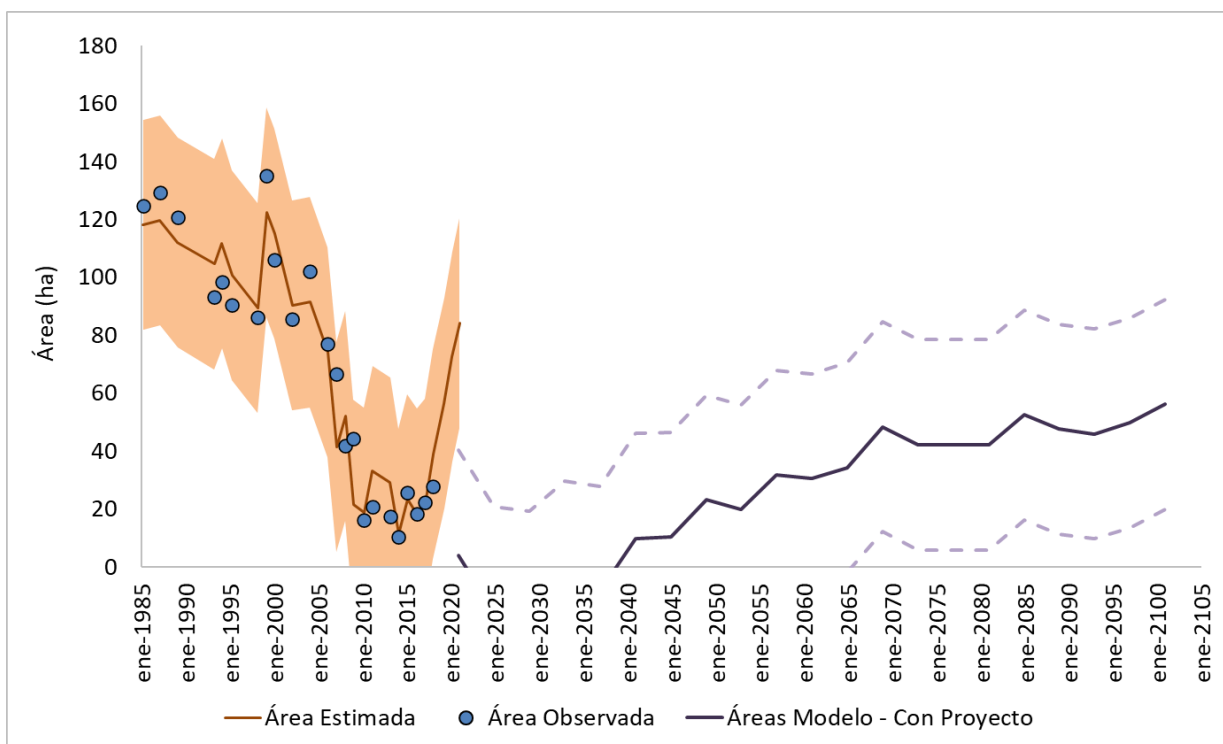
El resultado final de las áreas de cobertura vegetal estimadas a partir de los niveles futuros proyectados y la precipitación (obtenida de manera aleatoria tomando como base los registros pasados) para el Escenario Caso Base se presenta en la Figura 5-28, mientras que el Escenario Caso con Proyecto se presenta en la Figura 5-29.

**Figura 5-28: Áreas Observadas y Estimadas con Banda de Ancho  $\pm$  Percentil 95 para Periodo de Calibración y Para Estimaciones Caso Base**



*Fuente: Elaboración Propia.*

**Figura 5-29: Áreas Observadas y Estimadas con Banda de Ancho  $\pm$  Percentil 95 para Periodo de Calibración y Para Estimaciones Caso Proyecto**



*Fuente: Elaboración Propia.*

Con respecto a la estimación de áreas futuras, esta se hizo tomando como referencia los niveles proyectados a futuro obtenidos desde el Modelo Hidrogeológico de Collahuasi (extraídos a partir de los gráficos, no se encontró en la información revisada tablas con los resultados de niveles del modelo). Se agregó una banda de un ancho igual al percentil 95 de la distribución del error de estimación (correspondiente a aproximadamente 36 ha), de manera de tener un intervalo de confianza. Todos los valores de áreas observadas para el periodo de calibración caen dentro de este rango, por lo que se trata de un modelo que es capaz de reproducir con un buen grado de confianza las áreas de vegetación. Los valores de los años 2019, 2020 y 2021 están justo en el límite de la banda referida, lo que dice relación con lo señalado en cuanto a las características de la información utilizada para esos años.

Al inicio de las estimaciones se tienen diferencias que vienen a partir de los resultados del modelo, que también muestran, al inicio del periodo de modelación, una diferencia entre los datos observados y los modelados (ver Figura 5-24, Figura 5-25 y Figura 5-26). Lo anterior, debido a que el modelo no reproduce de buena manera los niveles en los pozos utilizados. Tanto para la situación sin proyecto como para la con proyecto las áreas estimadas llegan a cero durante un periodo de años. El caso Con Proyecto es mejora la situación para la vegetación, dado que los niveles comienzan a recuperarse antes, pero de todas maneras se trata de casi 20 años de una situación extrema para la vegetación (para el caso sin proyecto serían casi 45 años). Aquí es importante señalar el hecho de que se trata de un modelo que estima las áreas de vegetación, por

lo que valores iguales a cero no significa necesariamente una desaparición de la vegetación en la zona, pero sí da cuenta de una situación que puede afectarla de manera importante, pudiendo generar cambios en los tipos de planta, en los comportamientos (llevándolas a un estado de latencia para gastar un mínimo de energía, por ejemplo) y también de pérdida de vegetación.

Tal como se dijo anteriormente, los resultados del modelo no reproducen de buena manera los niveles en los pozos en cuestión, ya que muestran un descenso que no se condice con la recuperación que muestran los niveles antes del inicio del periodo modelado, lo que puede estar influyendo en el descenso marcado que se observa en las áreas de vegetación estimadas. Esto debe contrastado con el hecho de que, por ejemplo, Quebrada Blanca está en proceso de disminución de las extracciones y futuro cierre del pozo P-7B lo que podría ayudar a una recuperación más temprana y marcada de los niveles (los últimos datos registrados parecerían indicar algo así, pero debe hacerse un seguimiento acabado para ver si esto se mantiene o no). Y también se debe considerar la reposición que Collahuasi realiza en el punto donde afloraba la vertiente Michincha, mitigación que lleva casi 17 años de funcionamiento. De todas formas, el efecto de esta reposición, según los resultados mostrados en el presente trabajo, así como también en la documentación revisada, parece ser muy local, con un efecto en la vegetación más cercana al punto de reposición. Como ya ha sido mencionado anteriormente, la información disponible no permite hacer una estimación más detallada del efecto particular de la reposición.

### **5.3 CONCLUSIONES ELABORACIÓN Y APLICACIÓN DEL MODELO EN SALAR DE MICHINCHA**

- **Comentarios Generales con Respecto al Área de Estudio, Salar de Michincha**

El área de estudio, correspondiente al Salar de Michincha, se ubica en la cuenca de Michincha, dentro de la cual se ubican parte importante de las instalaciones de Collahuasi. El sistema en cuestión se encuentra afectado por las intervenciones propias de la minería, en este caso, extracciones que comenzó realizando Quebrada Blanca en 1993, y Collahuasi primero en 1998 para el desaguado del rajo Ujina y luego en 2005 para la recuperación de aguas que pudieran haber infiltrado desde el depósito de relaves de Pampa Pabellón.

Dado lo anterior, se trata de una zona particularmente afectada por el impacto antrópico relacionado con las actividades mineras. La autoridad ha tomado nota de aquello y ha ido tomando medidas en el tiempo para intentar atenuar tales efectos, con el objeto de mantener en buen estado el ecosistema, y las compañías han ido acatando y llevando a cabo las medidas que les han sido solicitadas por parte de las autoridades. A raíz de lo antes expuesto, se releva la importancia que tiene poder contar con herramientas que permitan estudiar este sistema y estimar los potenciales efectos futuros que podrían afectarlo de manera de tomar decisiones con más información para el cuidado de ecosistemas del tipo en cuestión. El presente trabajo constituye un paso más en ese sentido, que sería interesante de ser profundizado y sofisticado

de manera de tener una herramienta y/o directrices que pudieran en algún momento aplicarse a otros sistemas.

- **Conclusiones con Respecto a los Niveles y Relación con Intervención Antrópica**

Los niveles muestran una relación con respecto a la intervención antrópica a la que ha sido sometido el sistema, reflejado en las extracciones. Así, al ver la Figura 4-8 se tiene que hasta 1993 (año en que parten las extracciones) los niveles se muestran estables. Entre 1993 y 1996, cuando hay un aumento en las extracciones, se observa un descenso de los niveles hasta una nueva estabilización, que coincide también con una estabilización en la magnitud de las extracciones entre 1997 y 2002. A partir de 2003, hay un aumento en las extracciones, y que se mantiene en niveles elevados hasta 2011, y en todo este periodo se observa un marcado descenso de los niveles, que llega a ser de casi 3 metros en esos años. Desde 2011 en adelante se inicia un descenso en las extracciones, llegando a 0 en 2021, lo que tiene a su vez un correlato en los niveles, ya que muestran una recuperación importante, la cual llega a entre 2 y 2,5 m a 2021. Todo esto muestra la relación estrecha que hay entre las extracciones y el comportamiento de los niveles, con el consecuente efecto que esto tiene, a su vez, en las áreas de vegetación en el Salar de Michincha, dada la relación que tienen los niveles con aquellas también.

- **Conclusiones con Respecto al Trabajo con el Índice NDVI y Áreas de Cobertura de Vegetación Resultantes para Salar de Michincha**

El índice NDVI es uno de los más difundidos y usados para determinar la presencia o no de vegetación, así como también para ver si se trata de vegetación sana, o poco sana y/o escasa. A partir de un valor umbral determinado, se definieron las áreas de cobertura de vegetación para cada mes con el que se contó con información entre 1985 y 2021. Se analizaron más de 400 imágenes en total. A partir de lo anterior se generó la serie de tiempo de las áreas cubiertas por vegetación para el periodo en cuestión. Al hacer la superposición de esta serie de tiempo con los diversos hitos operacionales ocurridos en Michincha por parte de Quebrada Blanca y Collahuasi, con la serie de precipitación y con la serie de extracciones, y considerando también cómo es el funcionamiento del sistema, se estima que la serie de tiempo de las áreas de cobertura reproduce razonablemente bien el comportamiento de la vegetación en el tiempo. Esto sin dejar de lado, por supuesto, los problemas que también trae aparejados el trabajo con imágenes satelitales para el análisis de vegetación. Por ejemplo, para las áreas más pequeñas la incertidumbre es mayor, por lo señalado anteriormente sobre el tamaño del píxel y la estacionalidad de las áreas.

Se hizo una sensibilización del índice NDVI, variándolo de 0,13 a 0,11 y 0,10 para diferentes fechas. El resultado, que hace sentido, es que al flexibilizarlo las áreas aumentaron. Cuánto aumenten depende de varios factores, entre ellos: la época del año, la ocurrencia de eventos de precipitación, el régimen de extracciones, entre otros. Parece observarse una relación que muestra que para fechas en que la vegetación se encuentra con mejor salud/vigor, la variación de las áreas al modificar el valor del índice es menor que para fechas con áreas de vegetación

más pequeñas. Puede deberse, por un lado, a que el valor definido como umbral captura de mejor manera la presencia y estado de salud de la vegetación en meses con áreas mayores (lo que ocurre principalmente en verano), y por otro, que en meses con áreas de cobertura de vegetación menores, el NDVI puede tener un funcionamiento más inestable, asociado al tamaño del píxel de las imágenes LANDSAT. Así, al variar los valores del umbral, el índice puede capturar áreas que tengan una presencia de vegetación que en realidad es menor. Esto, recordando también que un píxel adquiere una tonalidad predefinida al aplicar un índice si más de la mitad de este cumple con la condición que se esté imponiendo, lo que refuerza lo señalado previamente, ya que puede haber píxeles que se activen con 51% de vegetación, pero al hacer la suma el área real de vegetación podría ser menor.

Por otro lado, la relación entre las áreas estimadas y las extracciones parece ser clara, tal como puede verse en la Figura 5-4. Así, a medida que aumentan las extracciones (en este caso, en el pozo 7B, de Quebrada Blanca) se ve una relación con una reducción general de las áreas, cayendo los máximos y mínimos. Esta probablemente no es la única causa para el descenso de las áreas, pero sí parece ser una de las importantes que explican la reducción en la vegetación que se ha observado en el Salar de Michincha, recordando lo señalado en cuanto al alto grado de intervención antrópica que se ha visto en este sector. A partir del hito del inicio de las extracciones en la zona por parte de Collahuasi se observa un descenso marcado de las áreas de cobertura de vegetación.

Se hizo también un chequeo con la información de transectos entregada por Collahuasi como parte de su Adenda 2 (septiembre de 2020). Se superpusieron los puntos de los transectos en que se identificó vegetación con los resultados de áreas para la época correspondiente (transectos tienen referencia de la época en que se realizaron, por ejemplo, verano de 2015 o invierno de 2017). A partir de este trabajo, se pudo reforzar el entendimiento del sistema, las variaciones intraanuales con áreas mayores en verano y menores en invierno, de la dinámica de crecimiento y disminución de la vegetación en cuanto a su distribución espacial, y a la distribución de las distintas especies según su hábito hídrico y cómo esto calza de buena forma con las áreas estimadas.

- **Conclusiones con Respecto a la Elaboración del Modelo Predictivo de las Áreas de Cobertura de Vegetación del Salar de Michincha**

Se definió usar las áreas máximas de verano para la elaboración del modelo. Esto se lleva a cabo con el objeto de tener más certidumbre sobre las áreas para el trabajo recién mencionado, pero trae aparejadas otras restricciones. Esto, pues el modelo queda restringido a los 3 o 4 meses del verano en que se dan las áreas máximas, para los cuales se necesita que haya imágenes disponibles, así como también mediciones de nivel en los pozos a utilizar. Así, los resultados del modelo podrían mejorarse si se tuvieran las áreas de cobertura y niveles medidos para todos los máximos, ya que hubo años en los que se contaba solo con parte de la información, no siendo posible utilizar la información de ese año. No obstante lo anterior, para los años que se validó el modelo (2019, 2020 y 2021), pese a que no todas las áreas correspondían al máximo



estival y a que hubo datos que se debieron estimar (la precipitación, ya que no se contaba con datos actualizados para todos los años), el modelo sí reproduce correctamente la tendencia de las áreas observadas (nuevamente se recuerda que son “observadas”, ya que se obtienen a partir de otro modelo como es el trabajo con imágenes satelitales e índices). Aunque, como consecuencia, el error de estimación en esos meses es mayor, en general, que para el periodo de calibración.

Justamente con relación a esto último, con respecto al error de estimación del modelo, hay varias formas de cuantificarlo y durante el trabajo con el modelo se evaluaron algunas con resultados que se detallan a continuación. El RMSE (*Root Mean Square Error*, o Raíz del Error Cuadrático Medio) obtenido finalmente fue de 10,9 ha. Para tener un valor de carácter más neutro, esto se normalizó por el rango de variación de las áreas observadas (lo que corresponde al NRMSE: *Normalized Root Mean Square Error*), obteniéndose un valor igual a 8,7%, el cual se considera aceptable. Por otro lado, el promedio del error (11,25 ha) y la mediana del error (10,24 ha) son similares entre ellas y al RMSE, lo que da cuenta de una distribución del error sin un sesgo importante (lo que también se tiene al observar la distribución de las áreas estimadas versus el error de estimación, ver Figura 5-22).

## 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 CONCLUSIONES

Sobre la base de los resultados obtenidos en el presente trabajo de tesis, en el presente acápite se presentan las conclusiones a partir del trabajo realizado, teniendo en consideración el objetivo principal de generar una metodología que relacione los niveles y variables climáticas (a partir del trabajo, se definió sólo usar la precipitación) para la posterior elaboración de un modelo o estimador de las áreas de cobertura vegetal futuras. Estas se separan según la temática a que correspondan.

- **Conclusiones con Respecto al Trabajo con Imágenes Satelitales e Índice NDVI**

Se trabajó con imágenes satelitales LANDSAT. Esto, dado que su extensión temporal permite hacer un análisis a lo largo de varios años. Por otro lado, el tamaño del píxel en estas imágenes es de 30 x 30 m, es decir, cubren un área de 900 m<sup>2</sup>. Esto puede potencialmente generar algunos problemas si se está trabajando con sistemas más pequeños que requieran análisis más finos de las áreas de vegetación, sobre todo para momentos del año en que, por las condiciones climáticas asociadas a la época en cuestión, las áreas puedan verse reducidas o en un estado de vigor menor (lo que ocurre, principalmente, en invierno).

Para el periodo en cuestión (1985 - 2021) hay tres series disponibles: LANDSAT 5, LANDSAT 7 y LANDSAT 8. Como ya ha sido mencionado, la serie LANDSAT 7 tiene un problema de pérdida parcial de la información desde mayo de 2003. Las series LANDSAT 5 y 8 no presentan problemas en su funcionamiento. Dado que se trata de información que podría ser útil, se intentó rellenar la información faltante en imágenes LANDSAT 7, para lo cual hay un amplio abanico de programas o rutinas disponibles en la web. Sin embargo, dado que se trata (como se señaló previamente) de áreas relativamente pequeñas y que las pérdidas de información requerían muchas veces rellenar gran parte del salar de Michincha, esto implicaba ingresar al análisis información que no existe, sino que se está generando de manera artificial, adicionando más incertidumbre al trabajo de elaboración del modelo o predictor. Esto llevó a la conclusión de no incluir en el trabajo las imágenes LANDSAT 7, y trabajar sólo con las series 5 y 8. Respecto a esto, al momento enlazar las dos series de NDVI, no se constata un cambio brusco entre ambas. Así, no se cuenta con información para el periodo que va entre febrero de 2002 y junio de 2003, y tampoco para el que va de octubre de 2011 a marzo de 2013.

Con respecto al índice NDVI, su uso es masivo para el análisis de imágenes satelitales con el objetivo de estudiar el comportamiento de la vegetación. Esto implica que se trata de un índice respaldado y, por lo mismo, que se puede usar con seguridad para el trabajo en cuestión. Además, su uso frecuente lo hace adecuado para elaborar una metodología como la que constituye el objetivo del presente trabajo, dado que, si se está pensando en su uso futuro, la idea es hacer accesible y fácil el poder ir actualizando la información que se utiliza para poder hacer una prognosis del comportamiento futuro de la vegetación. No obstante lo anterior,

también es importante mencionar algunas de las dificultades que plantea. Su uso en conjunto con la serie LANDSAT, dado el tamaño del píxel, puede generar un problema, en particular, con las áreas más pequeñas. Esto, pues al trabajar en periodos con áreas menores, el índice NDVI muestra una mayor inestabilidad, pudiendo tener asociado un error mayor en esos casos.

Por último, es importante señalar que la relación se obtuvo y las estimaciones se generan para el periodo estival. Esto, porque corresponde a las áreas de vegetación más grandes en el año (facilitando la estimación de las áreas, por elementos ya señalados anteriormente); porque las áreas en invierno, dada la cobertura nival que se observaba en ese periodo para una cantidad importante de años en el periodo en cuestión, generó muchas veces problemas para la estimación de las áreas de cobertura de vegetación en esos meses; y, por último, al hacer las estimaciones para el periodo estival, se está usando un criterio conservador para las estimaciones futuras, ya que permite constatar tendencias que si se ven para los periodos de mayor cobertura, es dable pensar que pudiera darse de manera más acentuada para las de menor cobertura, con potenciales efectos sistémicos o de largo plazo, sobre todo en el caso de caídas en las áreas de vegetación detectadas.

- **Conclusiones con Respecto a la Elaboración del Modelo Predictivo de las Áreas de Cobertura de Vegetación**

Con respecto a la elaboración del modelo predictivo, se estima que el resultado, generado mediante el trabajo con Regresión Lineal Múltiple (MLR por sus siglas en inglés), se ajusta de buena forma a las áreas estimadas a partir de imágenes satelitales. Lo anterior, pese a que en el proceso de elaboración del modelo intervienen algunos elementos que tienen espacio de mejora (brechas que se abordan con mayor detalle en el capítulo de Recomendaciones), lo que potencialmente podría mejorar el ajuste y enriquecer las estimaciones futuras de las áreas. Esto fortalecería la herramienta, de modo de dar aún más respaldo a su uso para una comprensión de qué podría ocurrir con las áreas bajo distintos escenarios futuros (de niveles y precipitación).

Por último, estudios, análisis y herramientas como las que tiene por objeto el presente trabajo apuntan a enriquecer y sofisticar un área que en Chile tiene un hito importante, al que tanto la autoridad como las empresas han citado extensamente. Este hito corresponde al PAT elaborado para el acuífero de Monturaqui – Negrillar – Tilopozo (DGA, 2001) el cual determinó que los niveles no podían bajar más de 25 cm sin afectar a la vegetación. Este PAT, a su vez, se basó en un estudio realizado por el Centro de Ecología Aplicada llamado “*Estudio de la Respuesta al Stress Hídrico de las Plantas del Sector Sur del Salar de Atacama*” (CEA, 1996), el cual determinó mediante algunos análisis en terreno los referidos 25 cm. Dada la importancia del tema, así como las consecuencias que se desprenden de imponer una condición sin tomar en consideración las características del lugar y la forma de realizar el estudio en cuestión, trabajos que puedan ampliar y complejizar los análisis a este respecto revisten de gran importancia, de manera de buscar un equilibrio justo entre el cuidado de los ecosistemas y la concreción de proyectos de inversión necesarios para el desarrollo futuro del país.

## 6.2 RECOMENDACIONES

A partir del trabajo desarrollado, surge una variedad de recomendaciones para tomar en consideración en el desarrollo de trabajos futuros que puedan profundizar en el desarrollo de herramientas como las que tiene por objeto este Trabajo de Tesis. Entre estas, se pueden mencionar las siguientes:

- Realizar un análisis de las áreas de vegetación en cuestión (mediante mediciones en terreno, mediante análisis usando *machine learning* y *big data* u otro) contrastando con áreas obtenidas a partir del NDVI para obtener un valor umbral o *threshold* específico para Michincha, en cada serie LANDSAT (5 y 8). Esto ayudaría a calcular con mayor precisión las áreas estimadas cubiertas por vegetación.
- Analizar cada cierta cantidad de tiempo (cada 5 años parece ser razonable para ajustar las series) una imagen de mayor resolución espectral (por ejemplo, Sentinel) de manera de ajustar las series de tiempo de las áreas de cobertura de vegetación. En particular, y como se vio en el presente trabajo, sistemas intervenidos o afectados pueden requerir de un análisis más sofisticado, para lo cual esto podría ser una mejora importante.
- También con imágenes de mayor resolución, hacer una desagregación más fina del NDVI y hacer comparaciones más detalladas con transectos medidos en terreno.
- Automatización del análisis de las imágenes en Google Earth Engine, de manera de poder hacer variaciones, modificaciones o sensibilizaciones de manera más rápida y eficiente.
- Probar con otros índices de vegetación, y también complementar con otro tipo de índices (agua, humedad u otros) que permitan diferenciar y estimar de mejor manera las áreas más pequeñas (tanto por efectos de estacionalidad como por el impacto de efectos externos). En relación con esto, también ver la mejor forma de incorporar el efecto del cambio climático en los análisis de estimación de áreas futuras.
- Trabajar en una estimación más sofisticada de la precipitación (por ejemplo, a partir de modelos), incorporando lo señalado en el punto anterior respecto del cambio climático.
- Explorar la posibilidad de incorporar en la elaboración del modelo, para la estimación de áreas futuras, el área del año anterior, de manera de generar un proceso más iterativo que permita una mayor precisión.
- Ensayar con el uso de otro tipo de regresiones o metodologías para la elaboración del modelo de estimación de áreas a partir de los niveles y variables climáticas.
- Con respecto a la reposición, dada la cantidad de tiempo que tiene funcionando, se sugiere hacer una revisión de ella, con el objetivo de realizar mejoras que puedan optimizar, desde el punto de vista de beneficiar a la vegetación de la zona (por ejemplo, buscar una mayor distribución espacial de la reposición que se hace en el punto donde aflora la vertiente Michincha).

- Por último, los Programas de Monitoreo de Aguas para este tipo de sistemas deben ser exhaustivos, y con la necesidad de perder la menor cantidad de mediciones posibles. Por lo general, se trata de lugares que pueden tener accesos difíciles y estar sometidos a condiciones climáticas extremas que complejizan los monitoreos. Para el caso de Michincha, se sugiere establecer que el criterio para cuando no se pueda realizar alguna medición sea manejado teniendo como objetivo siempre el lograr realizar la medición, dada la importancia crítica de contar con todos los datos posibles. Así, si no se puede realizar alguna medición, se debe intentar más de una vez en el mes si, por ejemplo, hubo una causa fortuita que impidió el monitoreo. Si definitivamente no se puede medir, debe quedar muy claramente consignado y respaldado el por qué no se pudo. Por otro lado, también se puede analizar la opción de instrumentalizar pozos en los que se sabe que el acceso se dificulta en ciertas épocas del año (análisis que debe incorporar las condiciones climáticas extremas, la posibilidad de pérdida de los sensores, entre otros).

## 7 BIBLIOGRAFÍA

Agroenergía (2019, junio) EIA “Continuidad Operacional Compañía Minera Zaldívar”. Anexo 4-4 Modelo Ecosistémico y de Cobertura Vegetal.

Ahumada, M, Faúndez, L. (2001). Guía Descriptiva de las Praderas Naturales de Chile. División de Protección de Recursos Naturales Renovables (DIPROREN), Servicio Agrícola y Ganadero (SAG). Ministerio de Agricultura de Chile. Santiago, Chile. (p.p 98)

Ahumada M., Faúndez L. (2009). Guía descriptiva de los sistemas vegetacionales azonales hídricos terrestres de la ecorregión altiplánica. Servicio Agrícola y Ganadero (SAG) Ministerio de Agricultura de Chile. Santiago, Chile

Ahumada M, Aguirre F, Contreras M, Figueroa, A (2011). Guía para la conservación y seguimiento ambiental de humedales andinos. Chile. Ministerio del Medio Ambiente. Disponible en [http://www.sinia.cl/1292/articles-53554\\_guiaConsSeguimientoHumedales2011.pdf](http://www.sinia.cl/1292/articles-53554_guiaConsSeguimientoHumedales2011.pdf).

Arcadis. (2018, diciembre) EIA “Desarrollo de infraestructura y mejoramiento de capacidad productiva de Collahuasi”. Capítulo 3.7- Hidrogeología.

Castro, R., Altamirano, T. (2013). Análisis de la tendencia histórica de vegetación azonal hídrica sector Ciénaga Redonda, Barros Negros y Pantanillo: altiplano Región de Atacama. Servicio Agrícola y Ganadero. Disponible en [http://www.sag.cl/sites/default/files/informe\\_final\\_veg\\_azona-agrosig2.pdf](http://www.sag.cl/sites/default/files/informe_final_veg_azona-agrosig2.pdf).

Centro de Ecología Aplicada (CEA) (1996, septiembre) Estudio de la Respuesta al Stress Hídrico de las Plantas del Sector Sur del Salar de Atacama.

Corvalán, J., Román, C. y Paneque, M. (2019). A model for estimating the vegetation cover in the high-altitude Wetlands of the Andes (HAWA). Disponible en <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/171580>

Davidson, N. (2014). How much wetland has the world lost? Long-term and recent trends in global wetland area. *Marine and Freshwater Research*. 65. 936-941. 10.1071/MF14173. Disponible en [https://www.researchgate.net/publication/266388496\\_How\\_much\\_wetland\\_has\\_the\\_world\\_lost\\_Long-term\\_and\\_recent\\_trends\\_in\\_global\\_wetland\\_area](https://www.researchgate.net/publication/266388496_How_much_wetland_has_the_world_lost_Long-term_and_recent_trends_in_global_wetland_area)

De la Fuente, A., Meruane, C., & Suárez, F. (2021). Long-term spatiotemporal variability in high Andean wetlands in northern Chile. *Science of The Total Environment*, 756, 143830. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143830>

Dirección General de Aguas (DGA). (2001, julio). Plan de Alerta Temprana para el Acuífero Monturaqui-Negrillar-Tilopozo. II Región. Antofagasta. (PAT-MNT). Departamento de Administración de Recursos Hídricos.

Di L, Chunxiang C, Wei C, Xiliang N. Rong T and Xiaojun X (2017) Monitoring and predicting the degradation of a semi-arid wetland due to climate change and water abstraction in the Ordos Larus Relictus National Nature Reserve, China. Disponible en <https://doi.org/10.1080/19475705.2016.1220024>

Gajardo Michell, R. (1994). La vegetación natural de Chile. Clasificación y distribución geográfica. Santiago, Chile: Editorial Universitaria (p.p 165)

Guo, M., Li, J., Sheng, C., Xu, J., & Wu, L. (2017). A Review of Wetland Remote Sensing. *Sensors*, 17(4), 777. MDPI AG. Disponible en <http://dx.doi.org/10.3390/s17040777>

James, G., Witten, D., Hastie, T., Tibshirani, R. (2013) A Introduction to Statistical Learning with Applications in R. Springer Texts in Statistics. Springer.

Li, D., Lu, D., Wu, M., Shao, X., & Wei, J. (2017). Examining Land Cover and Greenness Dynamics in Hangzhou Bay in 1985–2016 Using Landsat Time-Series Data. *Remote Sensing*, 10(2), 32. MDPI AG. Disponible en <http://dx.doi.org/10.3390/rs10010032>

Ministerio de Medio Ambiente, Área de Trabajo de Biodiversidad, Subsección Ecosistemas Acuáticos Continentales y Costeros. Disponible en <https://humedaleschile.mma.gob.cl/>.

Montgomery, E. L. & (1996). Summary of hydrologic data for Salar Coposa, salar de Michincha and Salar de Alconcha basins, and adjacent áreas Collahuasi Project. Chile. Volumen I.

N.A.S.A. (2000, agosto). Measuring Vegetation (NDVI & EVI). Disponible en: [https://earthobservatory.nasa.gov/features/MeasuringVegetation/measuring\\_vegetation\\_2.php](https://earthobservatory.nasa.gov/features/MeasuringVegetation/measuring_vegetation_2.php)

Secretaría de la Convención de Ramsar. (2016). Manual de la convención de Ramsar 5ª edición: Introducción a la convención sobre los Humedales. Subserie I: Manual 1 Cooperación internacional sobre los humedales. (p.p 9-12). Disponible en [https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/handbook1\\_5ed\\_introductiontoconvencion\\_s\\_final.pdf](https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/handbook1_5ed_introductiontoconvencion_s_final.pdf)

Soluciones en Gestión Ambiental (SGA). (2019) Adenda. EIA Desarrollo de Infraestructura y Mejoramiento de Capacidad Productiva de Collahuasi.

Soluciones en Gestión Ambiental (SGA). (2021) Adenda extraordinaria. EIA Desarrollo de Infraestructura y Mejoramiento de Capacidad Productiva de Collahuasi

Squeo, F., Warner, B., Aravena, R. y Espinoza, D. (2006). Bofedales: high altitude peatlands of the central Andes. Disponible en <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/119990>

United States Geological Survey (USGS) (2021). Landsat 7 | U.S. Geological Survey. Disponible en <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-7>

United States Geological Survey (USGS) (2022). Landsat Collections | U.S. Geological Survey. Disponible en <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collections>

Wilks, Daniel S. (2011) Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. International Geophysics Series, Volume 100. 3rd Edition. AP Press.



# ANEXOS

## ANEXO A

### Aspectos Generales Cuenca de Michincha

#### Geología y Geomorfología

En el área que cubre la cuenca de Michincha se reconocen las siguientes unidades geomorfológicas de este a oeste:

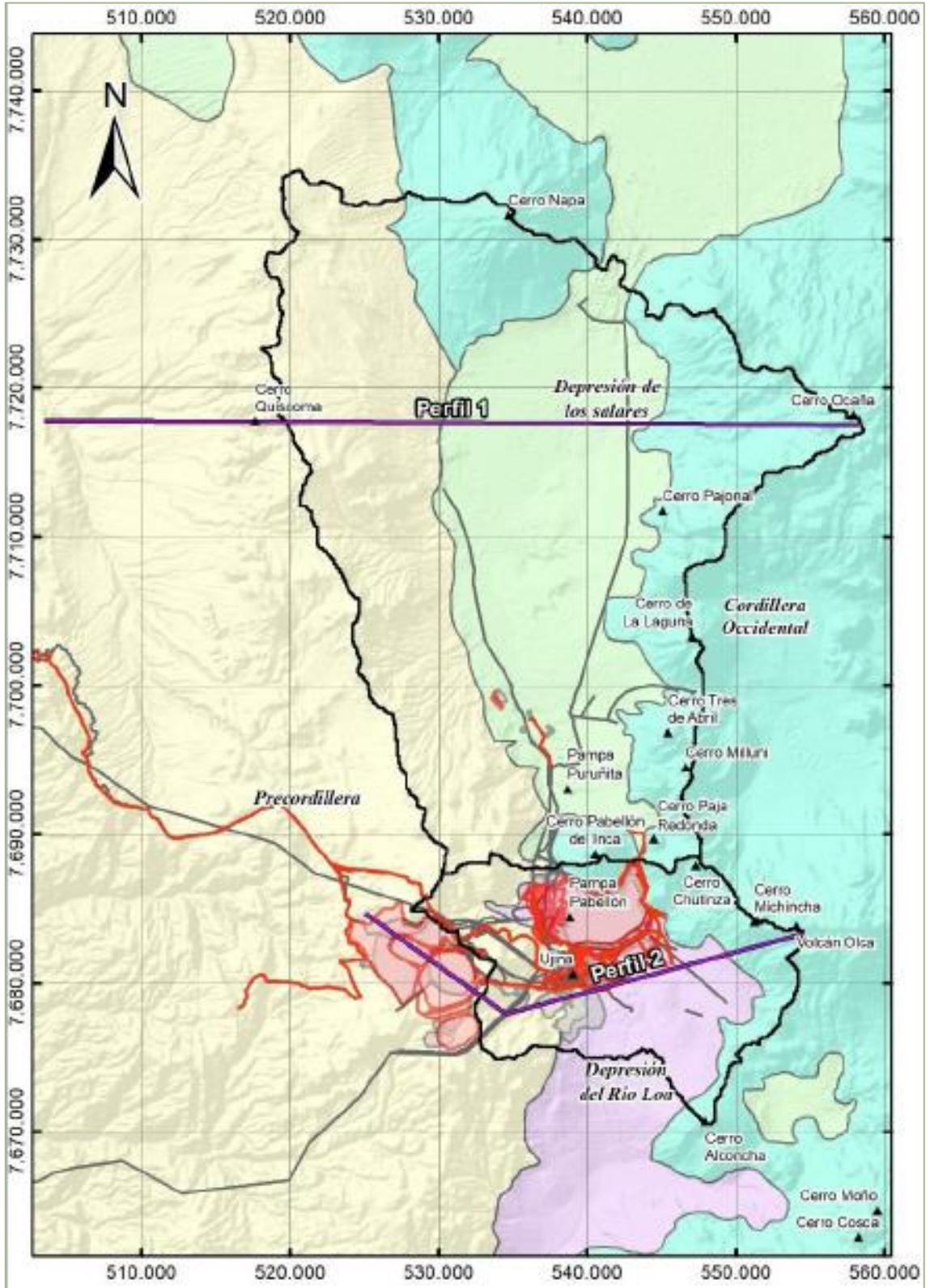
- Cordillera Occidental
- Depresión del Río Loa
- Precordillera

En la Figura 7, se presenta la distribución de las referidas unidades, como puede observarse ahí, la cuenca de Michincha forma parte de la unidad geomorfológica Depresión del Río Loa. Limita al este con la Cordillera Occidental y al oeste con el cordón oriental de la Precordillera, localmente denominado Sierra del Medio. Por otro lado, en la Figura 8 se muestra el detalle del Perfil 2, que pasa justamente por el Salar de Michincha, donde se ve el salar rodeado de las formaciones cordilleranas que lo limitan.

Por otro lado, en lo referido a la geología de superficie (ver Figura 9 y Figura 10) la unidad geológica más relevante corresponde a la Ignimbrita Ujina (Msiu). Esta se encuentra rellenando el centro y sur de la cuenca de Michincha, extendiéndose hacia la cuenca del río Loa y el sector suroeste de la cuenca de Alconcha. Su potencia máxima medida se ubica en la zona del depósito de relaves de Pampa Pabellón, donde presenta 370 m. Además, en la mitad norte de la cuenca de Michincha se encuentran depósitos aluviales y coluviales que sobreyacen a la Ignimbrita Ujina, agrupados como Relleno Sedimentario Indiferenciado (Rsi).

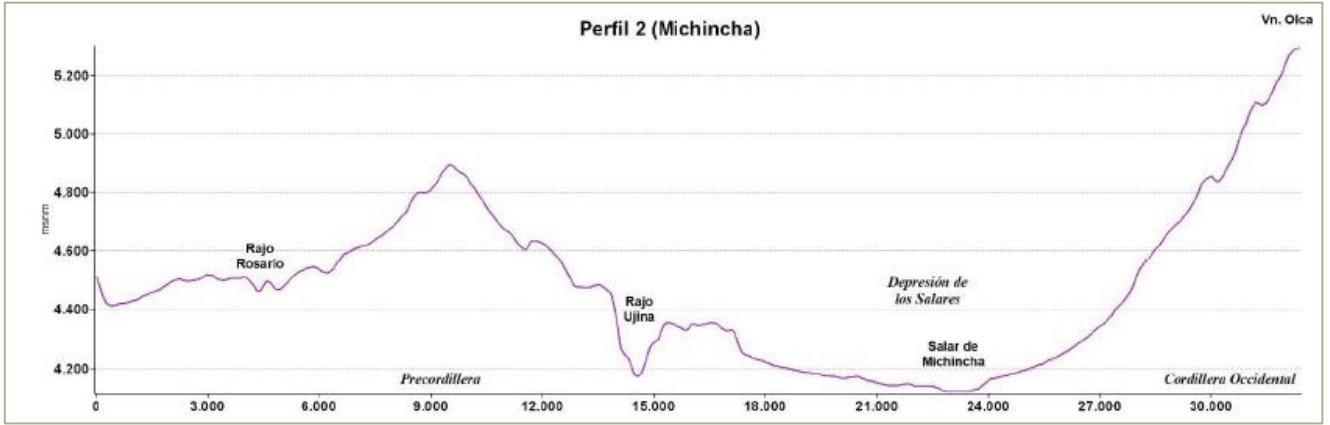
En cuanto a las estructuras, el principal sistema de falla en la cuenca de Michincha corresponde a la Falla Michincha. Esta corresponde a una falla transcurrente, sinistral, de rumbo noroeste, y empalma con la falla Guastipa hacia el norte, en la cuenca de Coposa. Esta falla afecta el centro de la cuenca de Michincha y coincide con el depocentro de ésta, favoreciendo el flujo de aguas subterráneas en esa dirección (Arcadis, 2018).

Figura 7: Geomorfología Cuenca Michincha



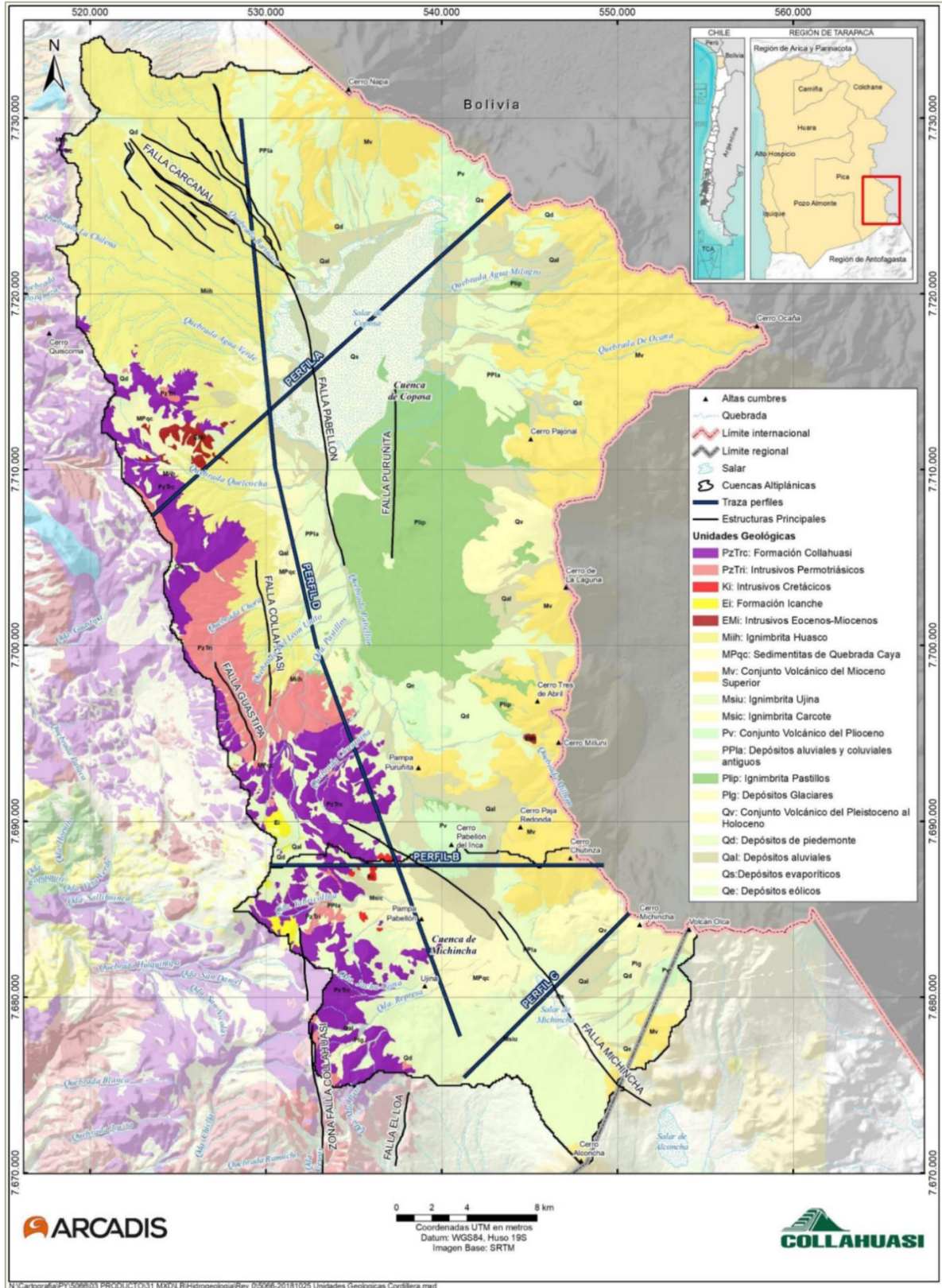
Fuente: Arcadis, 2018.

**Figura 8: Perfil 2 (Salar de Michincha)**



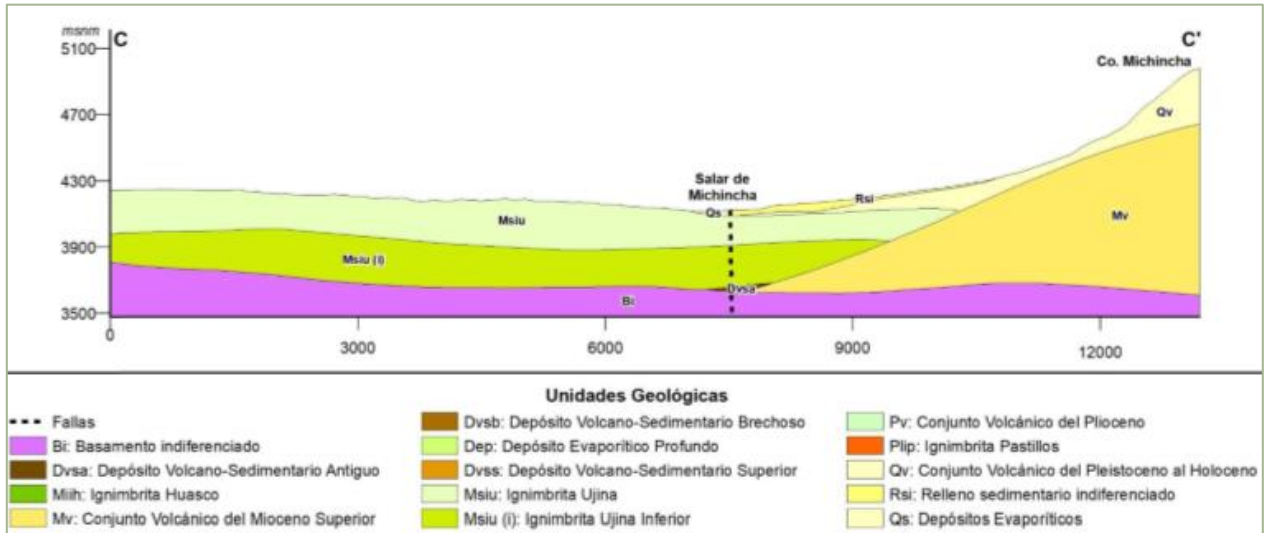
*Fuente: Arcadis, 2018.*

Figura 9: Geología Superficial Cuenca Michinchá



Fuente: Arcadis, 2018.

**Figura 10: Geología Superficial Cuenca Michincha – Detalle Perfil C-C'**



*Fuente: Arcadis, 2018.*

## Hidrología

En el presente acápite se hará una descripción de las variables que constituyen la principal recarga (precipitaciones) y descarga (evaporación) de los sistemas hídricos subterráneos. Esto últimos constituyen la principal fuente de recursos hídricos de la zona.

### *Descripción Hidrográfica*

Se presenta una descripción de la hidrografía, la red de drenaje y relieve general, además de estimaciones de la superficie de drenaje y curvas hipsográficas.

- Cuenca de Michincha:

La cuenca de Michincha colinda al Norte con la cuenca del Salar de Coposa, al Sur con la parte alta de la cuenca del río Loa, al Este con la cuenca del Salar de Alconcha y con Bolivia y al Oeste con las altas cumbres de la Cordillera de Domeyko en la zona de la cuenca del Salar de Llamara.

Es un sistema endorreico superficialmente, donde la precipitación que cae permanece en ésta, y abandona el sistema únicamente por flujos subterráneos o evaporación. Sus principales aportes son lo que descargan a la Pampa Pabellón y a los Carcanales de Ujina y Michincha, los cuales se activan en la estación húmeda del año. Los cerros de Michincha, Alconcha y Yabricollita son las laderas que ofrecen mayor área para los aportes en estos sectores. En la zona más plana se desarrollan escurrimientos superficiales semipermanentes en las quebradas Jachu-Ujina, Represa y Yabricollita, y todas drenan hacia el salar de Michincha.

La cuenca de Michincha abarca una superficie de 27.797,8 ha, comprendiendo las laderas de los cerros circundantes y la superficie del salar. La cuenca y el salar son relativamente pequeños en comparación con los de la región. A modo de comparación, el Salar de Huasco (también ubicado en la Región de Tarapacá) tiene una cuenca que abarca 157.200 ha (1.572 km<sup>2</sup>) y el salar tiene una superficie de 51 km<sup>2</sup>.

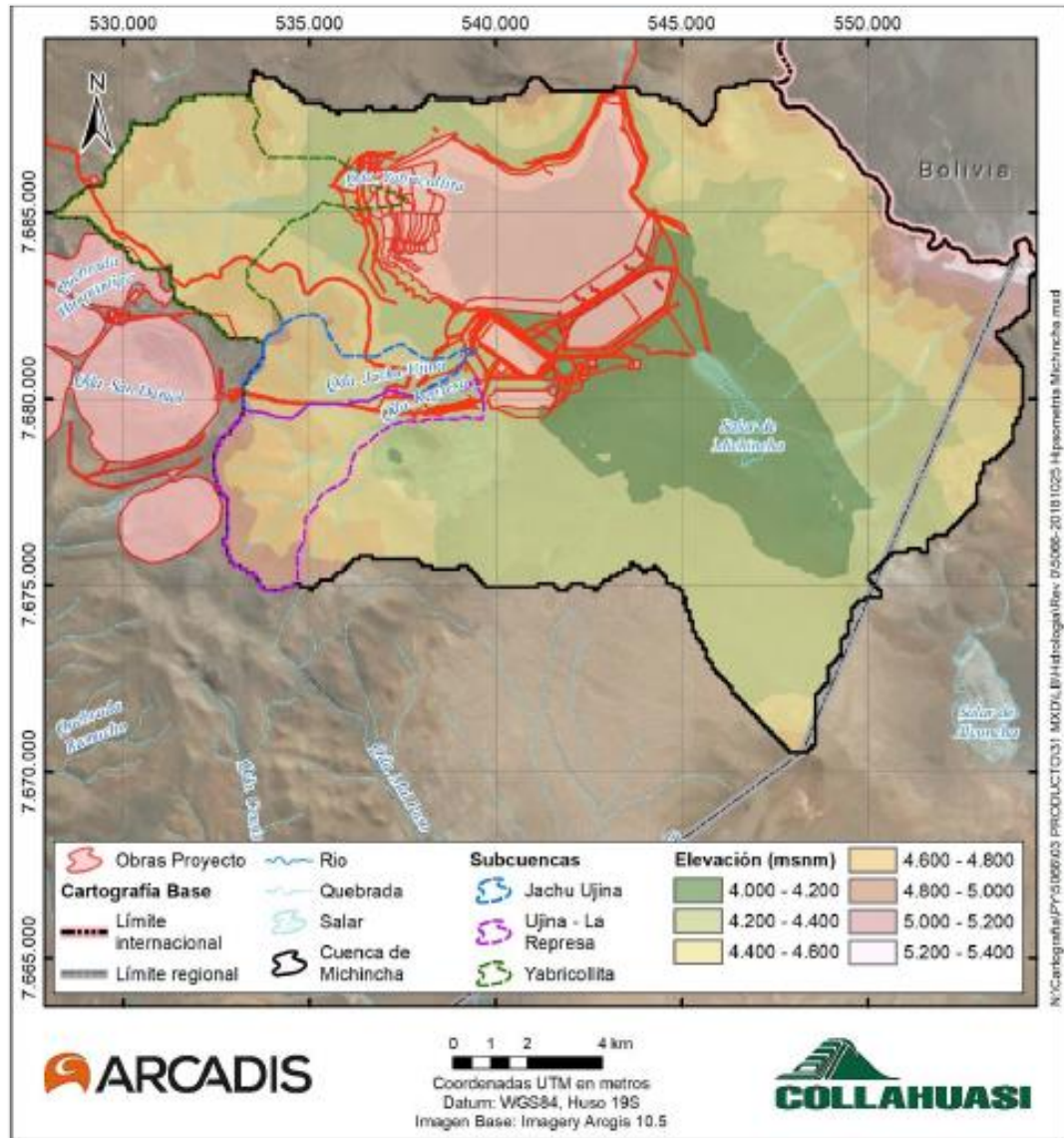
Las superficies totales y curvas hipsográficas para la cuenca de Michincha se presentan en la Tabla 1 y la Figura 11.

**Tabla 1: Curva Hipsográfica Cuenca Michincha**

<b>Bandas de Elevación (msnm)</b>	<b>Michincha (ha)</b>
4.000 – 4.200	6.234,4
4.200 – 4.400	11.060,9
4.400 – 4.600	5.621,1
4.600 – 4.800	3.543,0
4.800 – 5.000	901,7
5.000 – 5.200	315,0
5.200 – 5.400	121,7
Área total (ha)	27.797,8
Altura Media (msnm)	4.378

*Fuente: Arcadis, 2018.*

**Figura 11: Curva Hipsográfica Cuenca Michincha y Subcuencas**



*Fuente: Arcadis, 2018.*

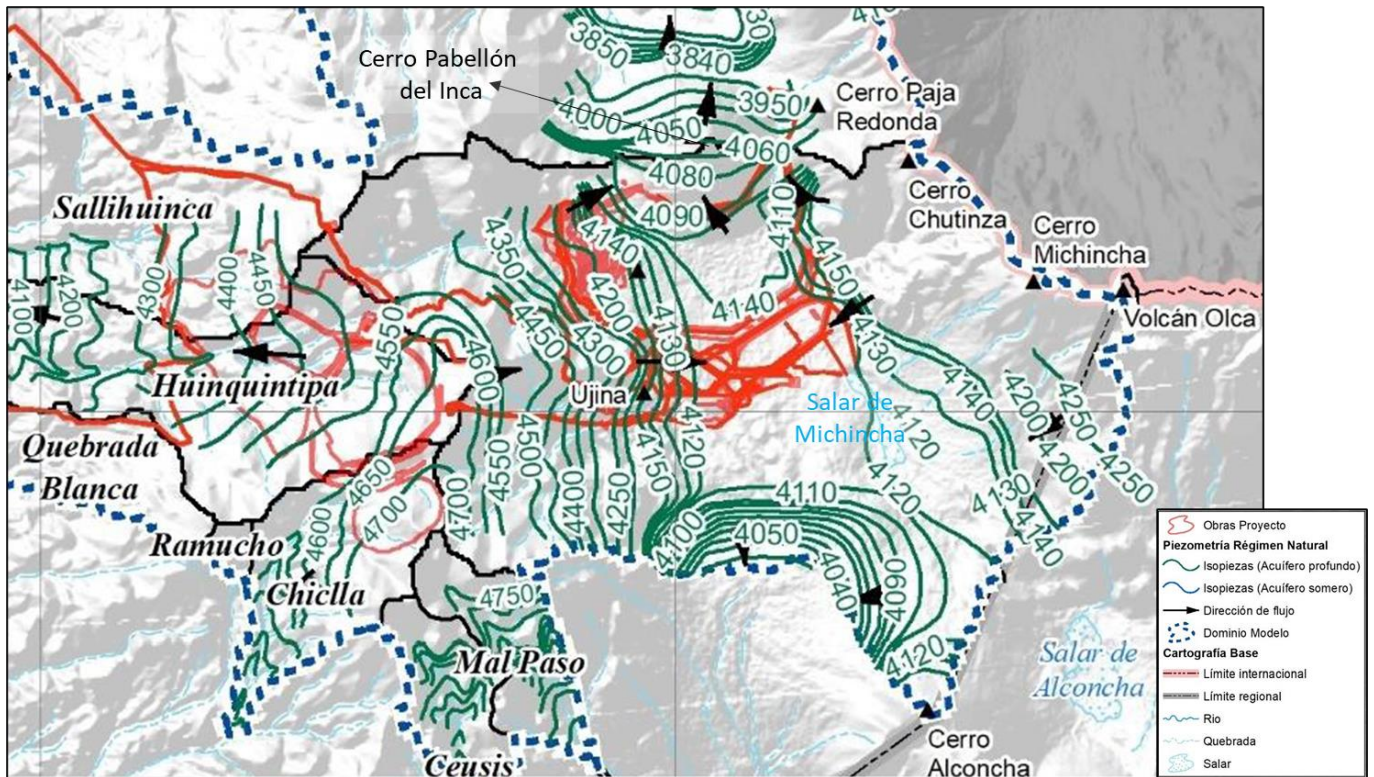
## Hidrogeología

### *Piezometría Cuenca de Michincha*

En el presente acápite se presenta la piezometría y direcciones de flujo del agua subterránea para la cuenca de Michincha, tal como fue presentada en el EIA de 2018 de Collahuasi (Arcadis, 2018). Esto se hace para el periodo de régimen natural (mayo/1993) y estado actual (noviembre/2017). Para ambos periodos, las piezometrías se realizan con la mayor cantidad de datos disponibles, y para los periodos secos del año. Esta información se utiliza de referencia, por lo que su actualización no aportaría de manera importante al objetivo del presente trabajo, escapándose de su alcance.

En la cuenca de Michincha, el acuífero se desarrolla en el relleno de la cuenca, conformado principalmente por la ya referida ignimbrita Ujina, la que alcanza una potencia observada máxima de alrededor de 400 m. Quebrada Blanca inició las extracciones de agua subterránea desde el acuífero en 1993, en tanto que Collahuasi las inicia en enero de 2005. Dado esto, para el régimen natural (Figura 12) se toman como referencia los niveles de mayo de 1993. Para el estado actual (Figura 13), por otro lado, se estableció como referencia noviembre de 2017, previo a las precipitaciones estivales que van de diciembre a marzo.

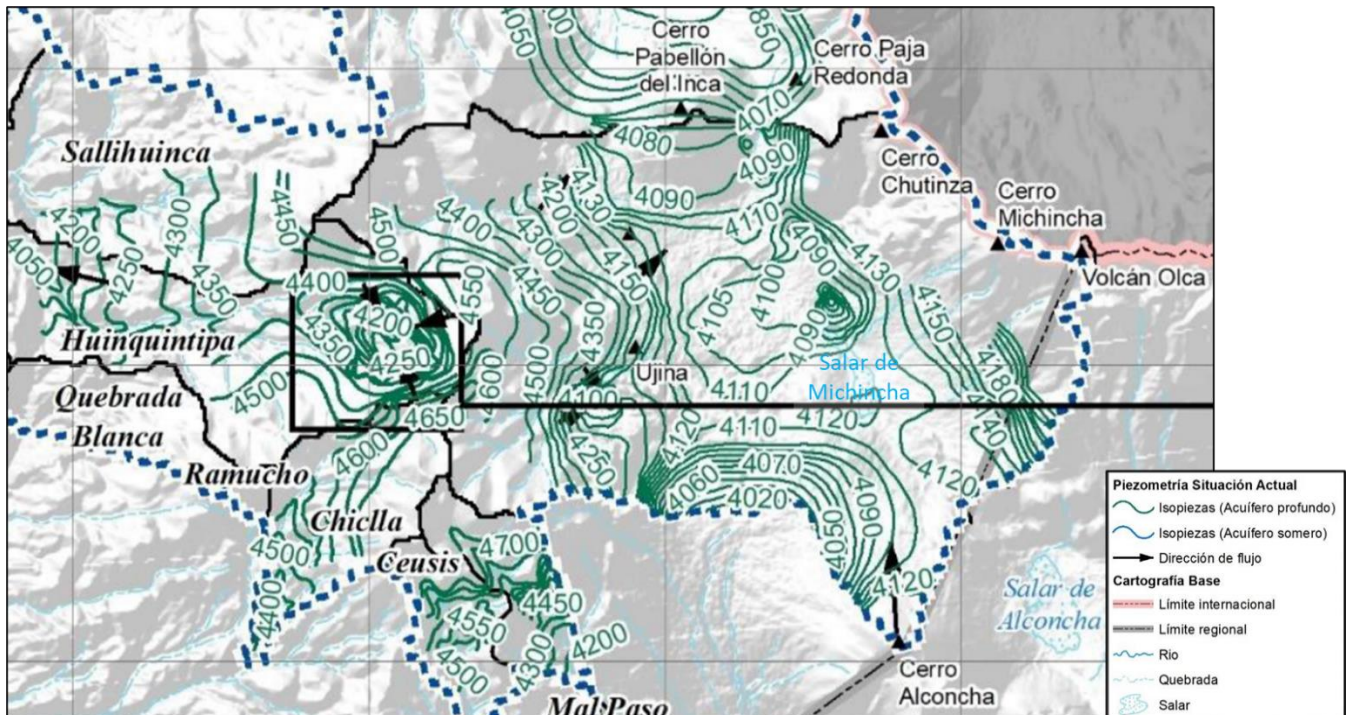
**Figura 12: Piezometría Cuenca Michincha – Régimen Natural (mayo 1993)**



*Fuente: Arcadis, 2018.*



Figura 13: Piezometría Cuenca Michincha – Estado Actual (noviembre 2017)



Fuente: Arcadis, 2018.

Como puede verse en la Figura 12 y Figura 13, las cotas piezométricas más altas observadas en la cuenca de Michincha se ubican en la Cordillera Occidental, donde ocurre la mayor parte de la recarga por precipitaciones, fluyendo hacia el centro de la cuenca. Por otro lado, las cotas piezométricas más bajas se ubican en el depocentro (salar) de la cuenca.

El flujo subterráneo presenta un flujo hacia el depocentro, donde se observa poca variabilidad de los niveles, los que fluctúan entre 4.110 y 4.115 msnm. El flujo escurre de manera predominante hacia el norte, descargando hacia la contigua cuenca de Coposa, con un gradiente del orden de 5-6%, y también existe una descarga subterránea hacia el sur (cuenca del río Loa) a través de la ignimbrita Ujina con un gradiente del orden de 2%.

Al sureste de la cuenca de Michincha, no se ve en los niveles una conexión con la cuenca de Alconcha. Estudios de diversa índole (geofísicos, hidroquímica) muestran que ambas cuencas comparten la recarga por precipitación proveniente de las partes altas del complejo volcánico El Olca (ver Figura 8).

Por último, y a partir de las piezometrías en régimen natural y la situación actual, se observa que debido al desaguado del rajo Rosario, la divisoria de aguas subterráneas entre la cuenca de Michincha y la de Huinquentipa/Chiclla, que si bien en régimen natural coincidía con la divisoria de aguas superficiales, se trasladó levemente hacia el este, generándose así la captura de parte de la recarga que ingresa a la cuenca de Michincha, como consecuencia del cono de depresión generado a causa del rajo Rosario y su desaguado.

Así, la cuenca de Michincha como cuenca hidrológica cerrada superficialmente (ya que, como se vio, tiene salidas subterráneas hacia cuencas aledañas) genera zonas de acumulación de agua en las zonas más bajas e induce niveles de agua subterránea someros, lo que, sumado a las altas tasas de evaporación, origina zonas de vegas, lagunas de evaporación y salares que se encuentran conectados con el acuífero.

### ***Precipitaciones***

Los rasgos climáticos del Altiplano responden a la circulación atmosférica de gran escala definidos por dos comportamientos característicos, el llamado Invierno Altiplánico o boliviano y el anticiclón del Pacífico.

Durante los meses de verano (diciembre – febrero) el flujo de sobre el Altiplano es Este a Oeste, se produce el transporte de humedad desde el interior del continente hacia los Andes centrales, alimentando las tormentas convectivas de verano que en forma agregada dan lugar al Invierno Altiplánico.

Al Este de los Andes centrales, la circulación atmosférica en niveles bajos está dominada por vientos del Noroeste que tienden a ser paralelos a la cordillera y presentan una máxima intensidad a unos 1.000 m sobre la superficie, formando una corriente en chorro de bajos niveles. Esta corriente en chorro es inducida por una baja presión de origen termo-orográfico que prevalece en el sector del Chaco (Suroeste de Bolivia y Paraguay), y a la vez mantiene el transporte de humedad desde la cuenca del Amazonas hacia las planicies subtropicales de Sudamérica.

La incursión hacia el Sur de los vientos del Este en los meses de verano se relaciona con la aparición con el rasgo atmosférico denominado Alta de Bolivia. Esta constituye un centro de alta presión ubicado en la parte alta de la tropósfera (sobre los 5 km y con mayor desarrollo cerca de los 10 km).

El Alta de Bolivia se trata de una respuesta al calentamiento inducido por las nubes convectivas sobre el interior del continente (cuenca Amazónica), que alcanzan mayor desarrollo y extensión precisamente en los meses de verano (Arcadis, 2018). Consistente con su ubicación en latitudes bajas, la precipitación sobre el Altiplano ocurre como consecuencia de la convección húmeda en la columna atmosférica, en la cual la turbulencia térmica levanta grandes masas de aire hasta que alcanzan su saturación y eventualmente continúan subiendo debido al calentamiento que provee el proceso de condensación. Si ese ascenso y saturación es suficientemente vigoroso, las nubes serán capaces de producir precipitación y algunas veces tormentas eléctricas. Debido a la iniciación térmica de la convección, ésta y la precipitación asociada muestran un marcado ciclo diario, con una fase activa durante las horas de la tarde y una fase inactiva en la madrugada y la mañana (Arcadis, 2018).

Aunque el Altiplano recibe grandes cantidades de radiación solar como para iniciar la turbulencia térmica en las tardes durante la mayor parte del año, la generación de tormentas convectivas y precipitación está fuertemente limitada por la disponibilidad de humedad, lo que determina finalmente la ocasionalidad de los eventos de precipitación.

Además de las descritas condiciones medias de precipitación a nivel continental y regional, cada 3 a 7 años el sistema climático presenta variaciones de origen natural y que producen variabilidad interanual caracterizada por la alternancia entre años secos (evento de El Niño) y años más lluviosos (evento de La Niña).

### ***Evaporación***

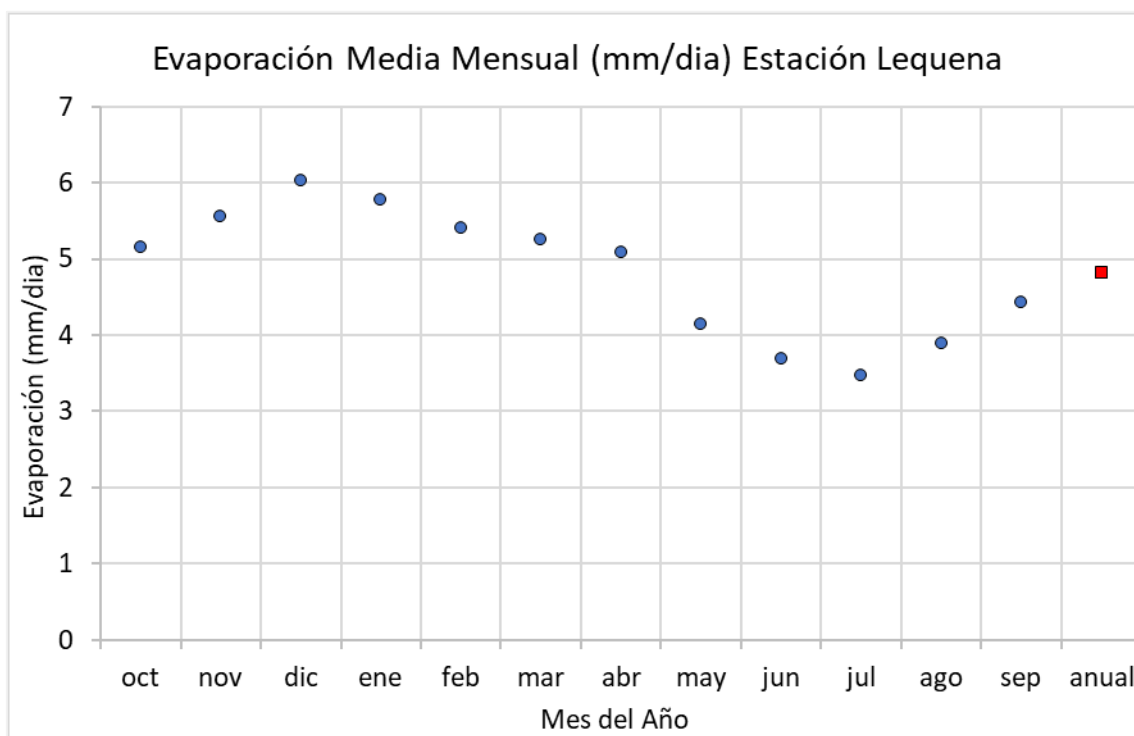
Para la caracterización de la evaporación, para el presente trabajo se recopiló la información de evaporación potencial a nivel diario en la estación Lequena (ver ubicación en Figura 9), perteneciente a la DGA y ubicada a 3.320 msnm. Se decidió utilizar esta estación dado que era la que contaba con mayor cantidad y extensión de datos de todas con las que se contó con información (marzo 1983 – diciembre 2018).

La información en las estaciones DGA es a nivel mensual de evaporación potencial medida en tanques evaporímetros, a la que se debe aplicar una corrección, debido a las transferencias de calor a través de las paredes y fondo del tanque. Para la zona el factor de corrección es del orden de 0,65 (Arcadis, 2018).

En la Figura 14 se presenta la evaporación media mensual corregida, en mm/día, para la estación Lequena, Además, en la Tabla 2 se presentan los valores de la evaporación media mensual medida y corregida en la misma estación Lequena.

Así, se tiene la evaporación máxima en el mes de diciembre con 6.0 mm/día y la mínima en julio con 3.5 mm/día. El promedio anual corresponde a 4.8 mm/día.

**Figura 14: Evaporación Media Mensual Corregida por Coef. Penman-Monteith  
Estación Lequena**



*Fuente: Elaboración Propia.*

**Tabla 2: Evaporación Potencial Nivel Medio Mensual (mm/día) a lo largo del año**

Estación Lequena	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	anual
Evaporación Potencial de Tanque Nivel Medio Mensual (mm/día)	7,9	8,6	9,3	8,9	8,3	8,1	7,8	6,4	5,7	5,3	6,0	6,8	7,4
Evaporación Potencial de Tanque Corregida a Nivel Medio Mensual (mm/día)	5,2	5,6	6,0	5,8	5,4	5,3	5,1	4,1	3,7	3,5	3,9	4,4	4,8

*Fuente: Elaboración Propia.*

## Vegetación

Se detallará la descripción de la vegetación acotada a la zona del Salar de Michincha, lo que incluye la descripción de la vegetación y flora vascular terrestre, describiendo el contexto biogeográfico y caracterizando la vegetación presente en el área señalada, caracterizando la flora vascular terrestre presente en la misma, e identificando las singularidades ambientales de la vegetación.

Como ya ha sido señalado, el foco del presente trabajo es la vegetación azonal. En la Tabla 3 se definen, de manera general, los distintos tipos de recubrimiento de suelo y formaciones vegetacionales para los sistemas azonales.

**Tabla 3: Definición Recubrimiento de Suelo y Formaciones Vegetacionales**

Recubrimiento	Sistema	Formación	Definición
Vegetación	Azonal	Bofedal <sup>1</sup>	Sectores en los que existen niveles de humedad permanente en el suelo, desde capacidad de campo a sobresaturado y que espacialmente se ubican en torno a los cursos de aguas, corrientes o lagunas con renovación de aguas. Los suelos se caracterizan por presentar altos porcentajes de materia orgánica y las especies presentan crecimiento en cojines en forma semiglobosa, originando cuerpos compactos. Así mismo, entre los cojines es posible encontrar especies que crecen formando césped corto.
		Bodefal - Pajonal <sup>1</sup>	Humedales que han sido afectados por la extracción de aguas provenientes de las napas subterráneas, en los que se ha podido constatar la recolonización, identificando las especies que comienzan a cubrir el humedal. Es así como en varias áreas de bofedal impactado ha comenzado a ser reemplazada por pajonales compuestos por especies del género Festuca y Pappostipa (sin. Stipa) principalmente, tanto en los sectores ubicados en la periferia como en el centro del bofedal.
		Pajonal Hídrico <sup>1</sup>	Sectores que presentan una mayor concentración de sales en superficie y los niveles freáticos y el suelo tiene un contenido de materia orgánica media a baja. Las especies vegetacionales tienen crecimiento cespitoso con desarrollo de follaje aéreo alto (mayor a 40 cm de altura), conformando penachos herbáceos de tamaño medio a grandes.
		Pradera <sup>2</sup>	Formación vegetal azonal hídrica donde la cobertura del tipo biológico herbáceo es dominante.
		Matorral <sup>2</sup>	Formación vegetal azonal hídrica donde la cobertura del tipo biológico arbustivo es dominante.
		Vega <sup>1</sup>	Sectores con niveles freáticos superficiales pudiendo o no presentarse niveles de saturación, mientras que el contenido de materia orgánica del suelo es medio a bajo, presentándose en este último caso, mayor afloramiento salino. Las especies presentan crecimiento rizomatoso, desarrollando un césped parejo o con desarrollo de pequeños cojines herbáceos menores a 40 cm de altura.

<sup>1</sup>: Ahumada, M, Faúndez, L., 2001

<sup>2</sup>: Arcadis, en base a Ahumada M., Faúndez L, 2009.

*Fuente: Arcadis, 2018.*

De acuerdo con Ahumada M. y Faúndez L. (2009), el área de interés se encuentra en la Ecorregión altiplánica, donde el patrón dominante que determina la presencia de vegetación herbácea y arbustiva responde principalmente a factores zonales, los que presentan un continuo zonal influenciado por agentes forzantes o modeladores del paisaje, tales como las precipitaciones estivales, pendiente, exposición y altitud, principalmente.

Los mismos autores señalan que las formaciones que hay en la ecorregión son las siguientes:

- Pajonales: corresponden a una formación vegetal compuesta por especies de gramíneas de crecimiento cespitoso. “Forman una champa tipo coirón” compuesta de pastos muy duros y toscos.
- Matorrales: formados por especies arbustivas de crecimiento bajo y de hojas reducidas y resinosas.

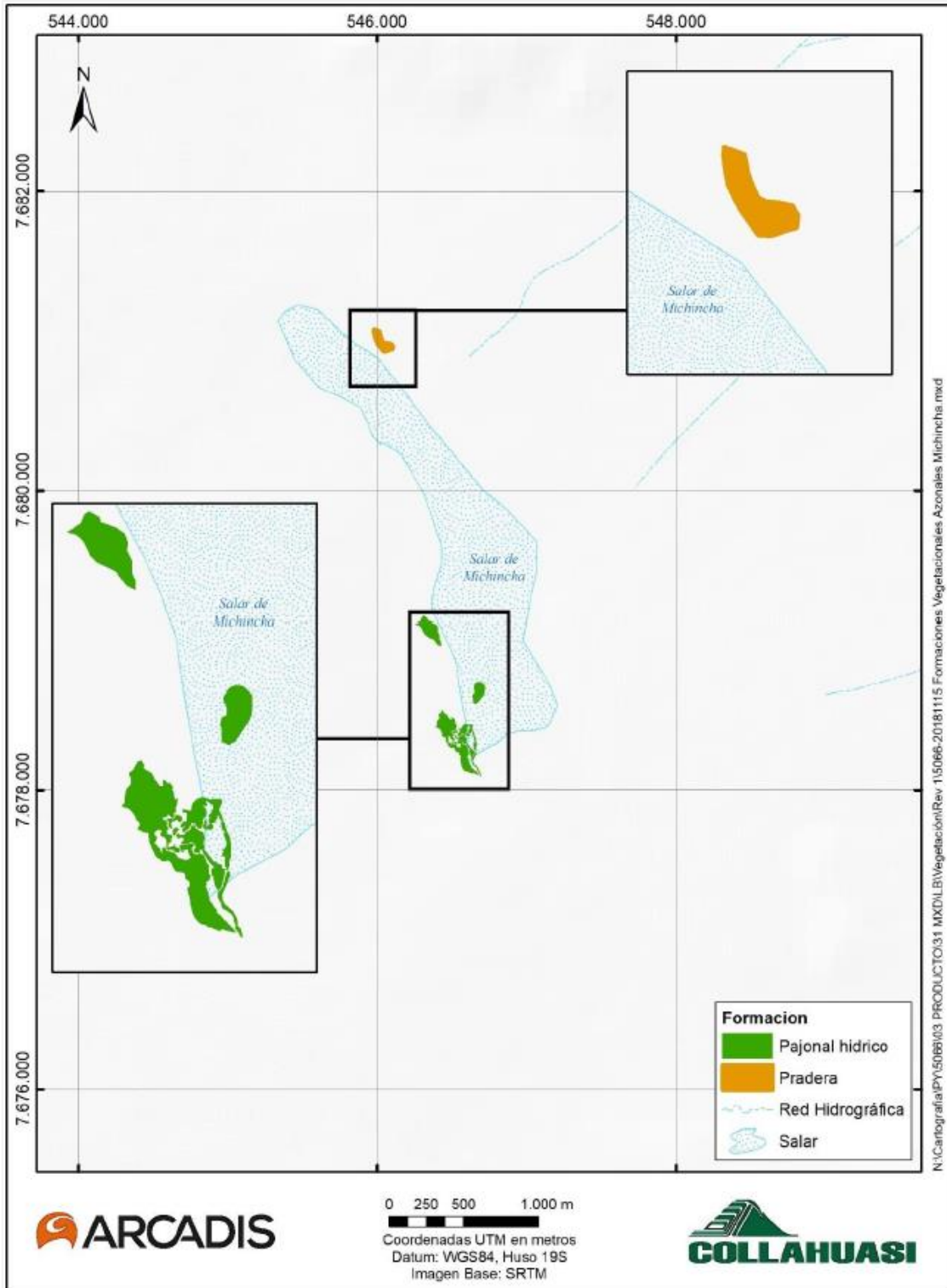
La vegetación azonal según Ahumada M. y Faúndez L. (2009) es un tipo particular de vegetación, y también lo es la relación con el medio que la contiene. Se destaca como principal componente la presencia de un acuífero cercano a la superficie del terreno, el que determina la presencia de vegetación azonal hídrica y que manifiesta variaciones inter e intra anuales producto de las variaciones climáticas propias de los cambios de estación y de los ciclos climáticos que se presentan en un periodo de años. Esta variabilidad se expresa en diferencias de humedad en el perfil de suelo y en los niveles de déficit hídrico, lo que a su vez determina un balance hídrico negativo en ciertos periodos del año, lo que se manifiesta como afloramiento salino. Ahumada y Faúndez les confieren a estos sistemas tres características principales:

- Capacidad de resiliencia, expresada en la capacidad de mantener el sistema activo (en lo referido a parámetros físicos, químicos y biológicos), a pesar de las condiciones extremas de aridez a que son sometidos en ciertos periodos del ciclo climático.
- Presencia de especies hidrófilas mientras más cercano se está de los afloramientos de agua o de las lagunas con renovación de agua permanente, acompañadas de gramíneas que también presentan condiciones de menor humedad.
- Contenido de materia orgánica del sustrato, lo cual se relaciona con el contenido de humedad de este.

También respecto de la vegetación azonal, Gajardo (1994) menciona a los bofedales de *Oxychloe Andina* como un complejo florístico y vegetacional típicamente ubicado en los cursos de agua del altiplano, bien zonificadas desde lugares con aguas corrientes a aquellos más secos.

En la Figura 15 se presentan las formaciones de vegetación azonal en el Salar de Michincha.

**Figura 15: Formaciones Vegetacionales azonales en el Salar de Michincha**

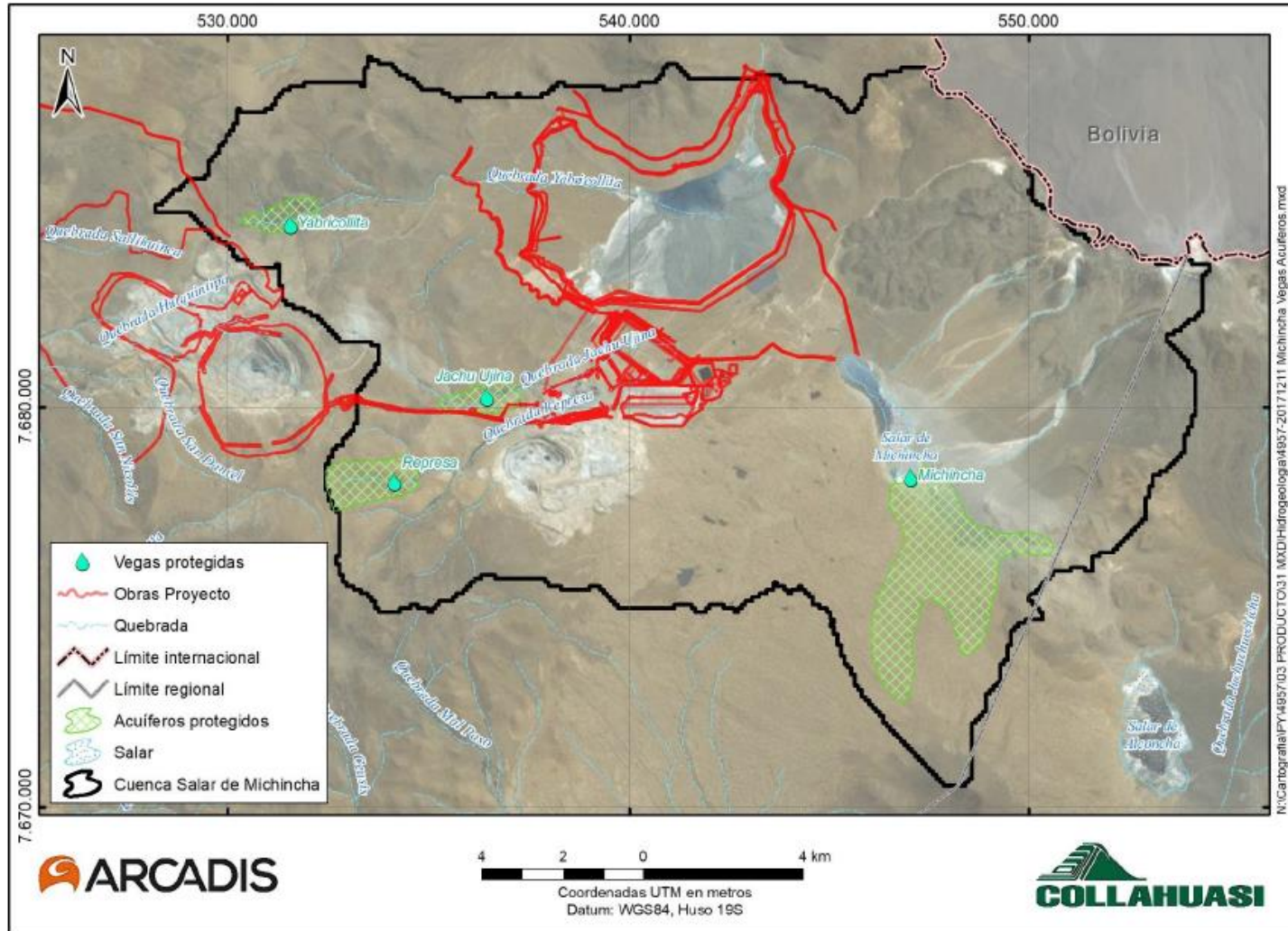


*Fuente: Arcadis, 2018.*

A lo anterior se debe agregar también que las áreas ambientalmente sensibles de la cuenca de Michincha corresponden a zonas de vegas, bofedales y vertientes, todas contenidas en 4 acuíferos protegidos por la DGA (Resolución DGA N°909 de 1996): Yabricollita, Ujina, La Represa y Michincha, los cuales se presentan en la Figura 16.



Figura 16: Áreas Ambientales Sensibles Cuenca de Michincha



Fuente: Arcadis, 2017.

## Calidad de Aguas

Se hizo una recopilación y posterior análisis de los antecedentes químicos de calidad de aguas, enfocada en el salar de Michincha. El periodo preoperación corresponde a la situación antes del inicio de actividades de Collahuasi considerada hasta junio de 1998; el periodo de operación corresponde desde el inicio de las actividades de Collahuasi en julio de 1998 hasta diciembre de 2014, y el periodo actual corresponde a la situación reciente, desde enero de 2015 a diciembre de 2018. Se hizo un análisis de evolución temporal de pH, Conductividad Eléctrica (CE) y Sulfato (SO<sub>4</sub>) en puntos de interés para el presente trabajo.

En primer lugar, para el balance iónico y para los gráficos de caja de parámetros en el Salar de Michincha se presenta lo recopilado a partir del EIA de Collahuasi (Arcadis. 2018).

Debido a que la naturaleza de las aguas monitoreadas que se encuentran en el área de estudio, hay una presencia de alta carga iónica, por lo que el error del balance iónico puede ser mayor (Arcadis, 2018). Así, en el EIA de Collahuasi se definió el rango de error del BI  $\pm 10\%$  para validar los datos medidos.

El balance iónico se basa en que, en una muestra dada, las cargas positivas (cationes) deben ser iguales a las cargas negativas (aniones), y si no son iguales, se define un error del balance iónico tal como se muestra en la ecuación siguiente:

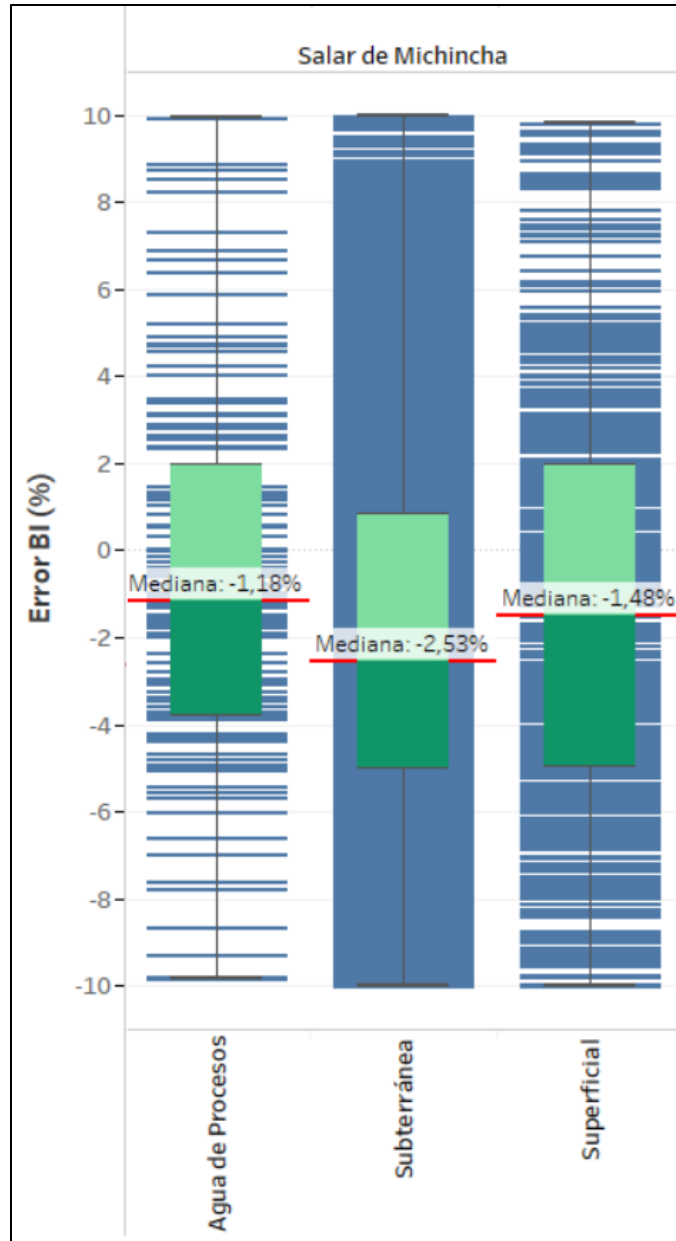
$$\text{error BI (\%)} = 100 \times \frac{\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones}}{\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones}}$$

En la Figura 17 se presentan los valores del error del balance iónico de las muestras correspondientes al Salar de Michincha. Tal como puede verse ahí, las medianas del error del balance iónico se ubican relativamente cerca del 0, por lo que el criterio de validez de los muestreos es correcto.

Luego, en la Figura 18 se presentan los valores de pH, CE, Sulfato y Cloruro para el Salar de Michincha, parámetros de calidad de aguas típicamente usados para describir las características físico-químicas del agua, ya que constituyen indicadores de alteración de la calidad de las aguas (por ejemplo, si hubiera filtraciones desde un tranque de relaves hacia la napa, debiera verse claramente un aumento en los sulfatos y una disminución del pH, dada una acidificación de las aguas subterráneas). Con respecto al pH, se tiene que la mediana está en torno al valor neutro, aunque de todas formas el pH presenta una gran variabilidad, sobre todo en las aguas subterráneas en que se tienen registros de pH entre un poco menos de 3 hasta casi 10 UpH.

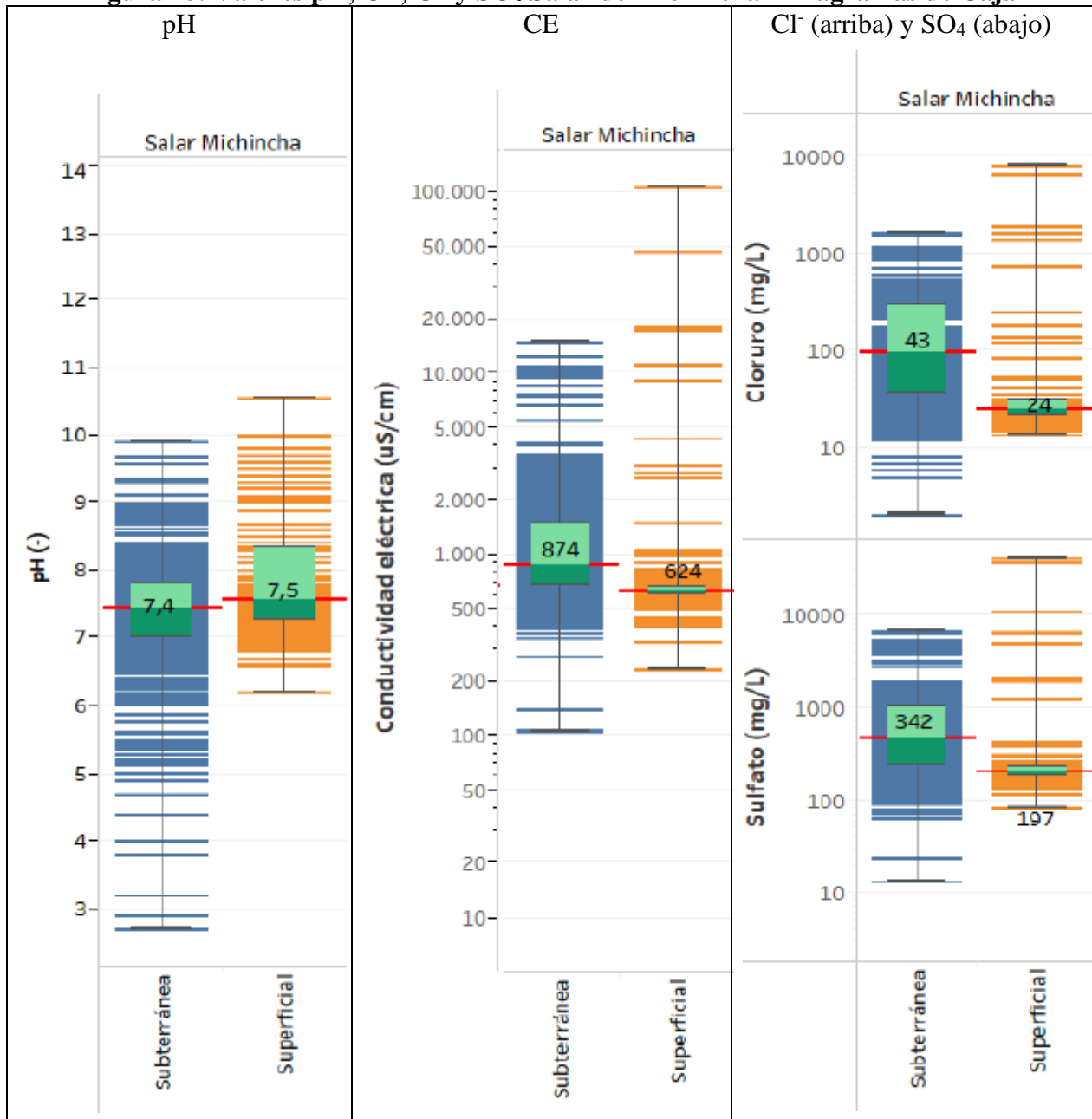
En cuanto a la CE, en las aguas superficiales del Salar de Michincha se tienen grandes fluctuaciones, yendo desde los 235  $\mu\text{S/cm}$  hasta valores que superan los 100.000  $\mu\text{S/cm}$  en la laguna del salar. Pese a lo anterior, la media es igual a 624  $\mu\text{S/cm}$ . Por último, las concentraciones de cloruro y sulfato están en valores de mediana bajo 50 mg/l y 350 mg/l, respectivamente.

**Figura 17: Valor Error del BI Salar de Michincha – Diagrama de Cajas**



*Fuente: Arcadis, 2018.*

**Figura 18: Valores pH, CE, Cl<sup>-</sup> y SO<sub>4</sub> Salar de Michincha – Diagramas de Caja**



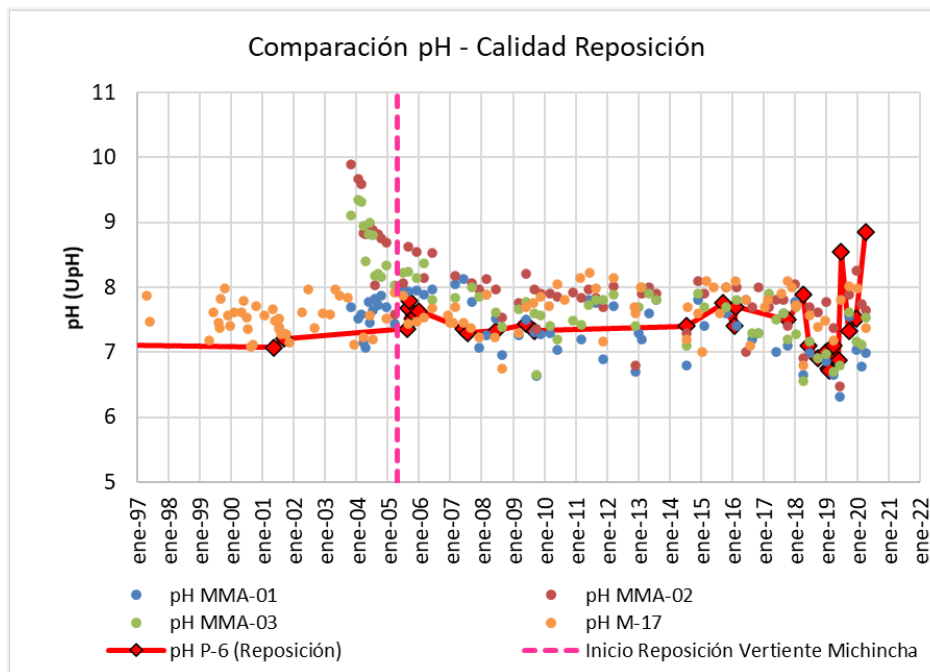
*Fuente: Arcadis, 2018.*

Como ya ha sido mencionado, a partir de 2005 Collahuasi realiza una reposición de caudal en el punto donde afloraba la vertiente Michincha, la cual desaparece en 2003 al aumentar los bombeos en la cuenca. Para ver cómo se compara la calidad de aguas de la reposición con pozos cercanos de interés (ver Figura 4-3), se graficaron las calidades registradas en los pozos MMA-01, MMA-02, MMA-03 y M-17 con la registrada en el pozo P-6, desde el cual se extrae el agua que se repone en el punto antes señalado. Los parámetros elegidos fueron 3 de los mismos que se mencionaron al comienzo de este acápite, a saber: pH, Conductividad y Sulfato.

A continuación, en la Figura 19, Figura 20 y Figura 21 se presentan los datos de pH, CE y SO<sub>4</sub>, respectivamente. En fucsia se agrega la fecha en que comienza la reposición en la vertiente Michincha (mayo de 2005). Hay registros de calidad previo a esa fecha dado que el pozo P-6 existía desde antes de 2005, lo que ocurre es que a partir de ese año se utiliza para extraer el agua que se repondrá en la vertiente Michincha.

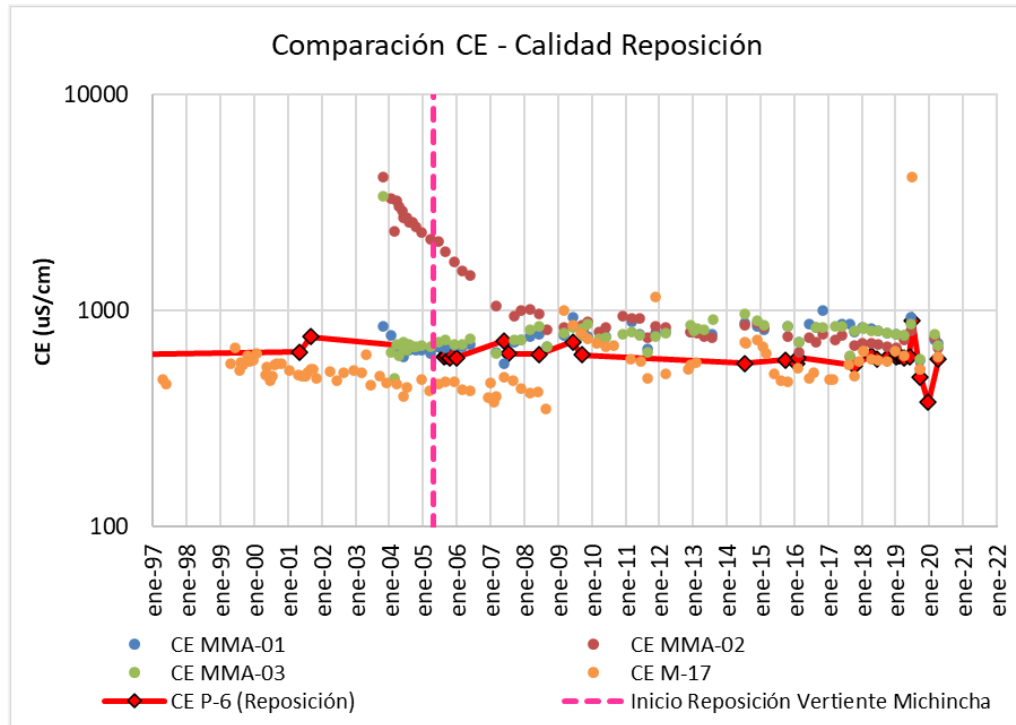
En las referidas figuras se puede visualizar que la calidad de aguas actual en general en los pozos cercanos al punto de reposición se asemeja a la de la reposición. El efecto más claro parece observarse en el punto MMA-02, aunque se debe tener en consideración que los distintos parámetros venían disminuyendo en magnitud desde antes que comenzara la reposición. También parece observarse un efecto en los últimos registros (2018 en adelante) en que la calidad registrada en P-6 muestra variaciones no vistas previamente (para los 3 parámetros analizados) que parecerían tener un efecto en la calidad de los pozos circundantes. Lamentablemente se cuenta con poca información de calidad para P-6, lo que no permite ahondar para establecer de manera más clara si hay una relación entre ambas calidades.

**Figura 19: Comparación para pH – Calidad Reposición y Pozos de Interés**



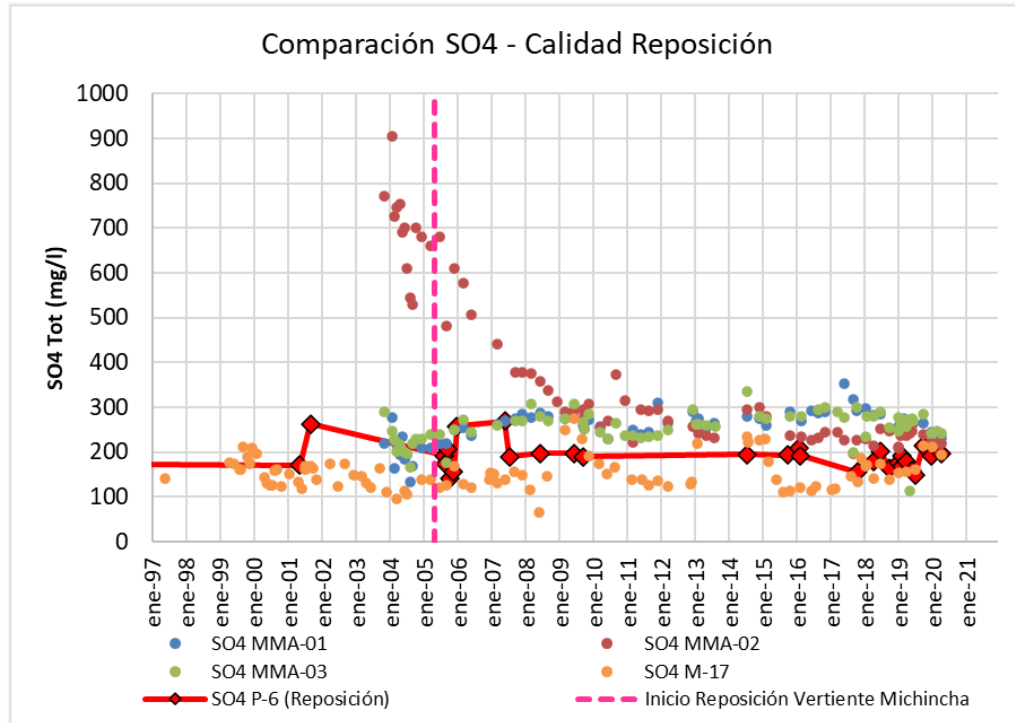
*Fuente: Elaboración Propia.*

**Figura 20: Comparación para CE – Calidad Reposición y Pozos de Interés**



*Fuente: Elaboración Propia.*

**Figura 21: Comparación para SO4 – Calidad Reposición y Pozos de Interés**

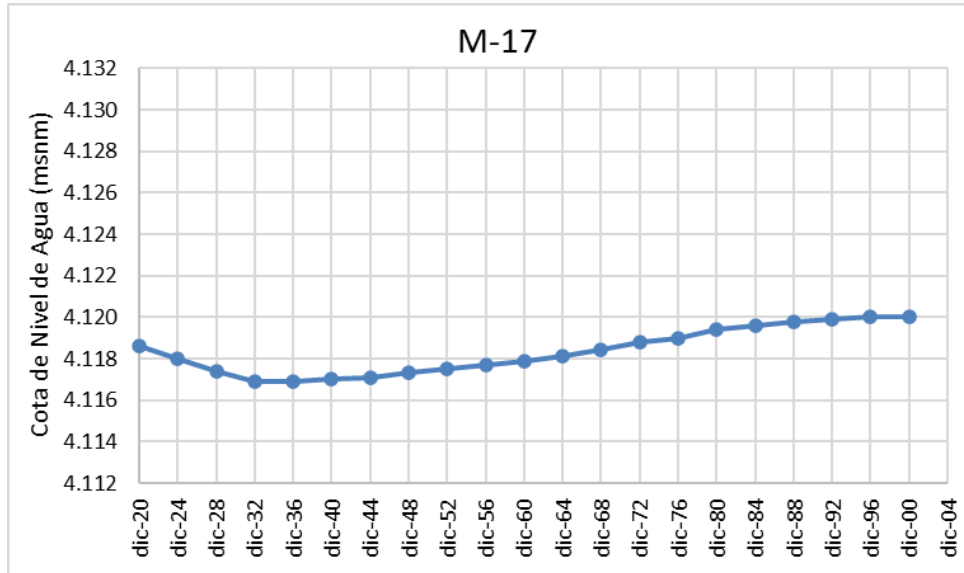


*Fuente: Elaboración Propia.*

## ANEXO B

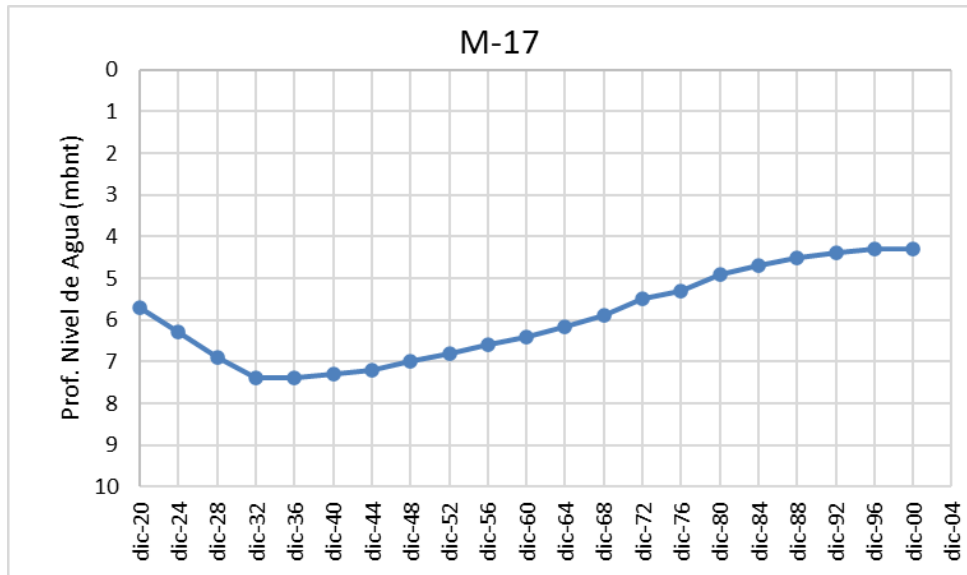
### Gráficos de Cota y Niveles Para Pozos M-17, MMA-02 y MMA-03 a Partir de Datos Rescatados de Resultados Modelo Hidrogeológico de Collahuasi

Figura 1: Cota de Nivel de Agua – Pozo M-17



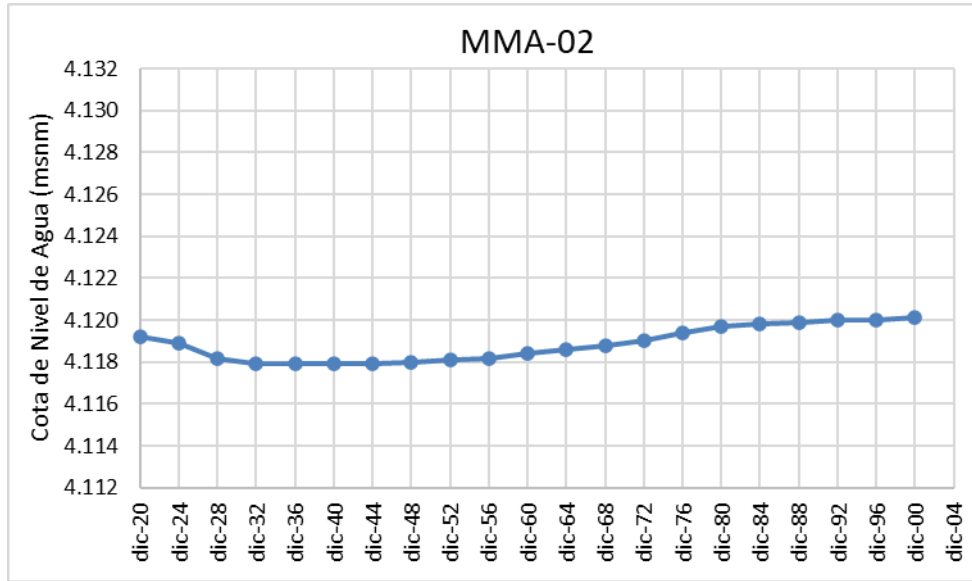
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 2: Profundidad del Nivel de Agua – Pozo M-17



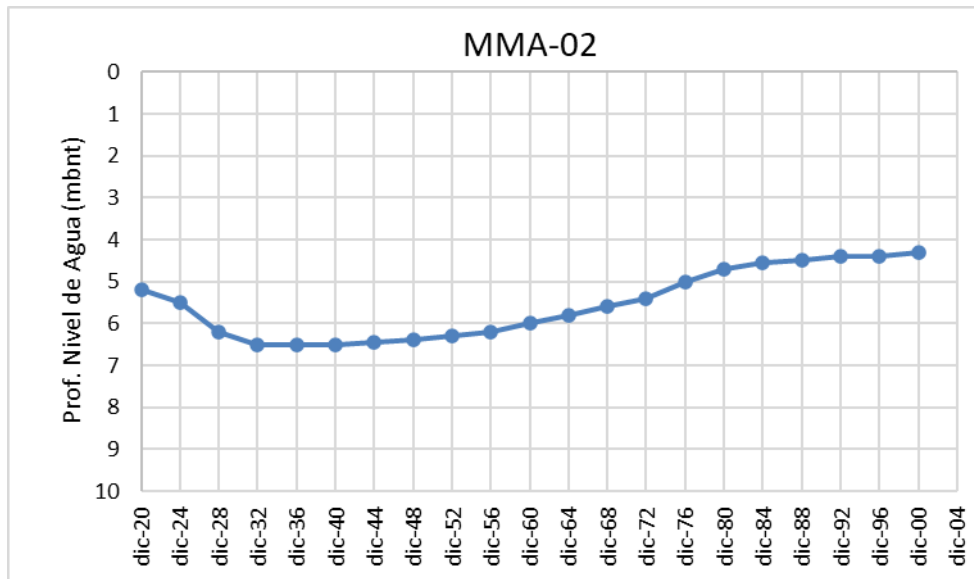
Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 3: Cota de Nivel de Agua – Pozo MMA-02**



*Fuente: Elaboración Propia.*

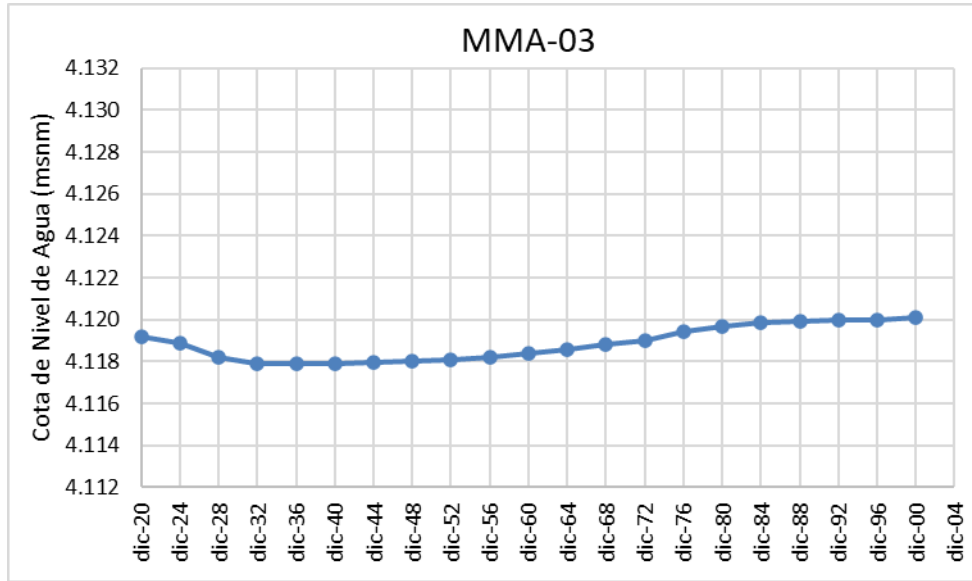
**Figura 4: Profundidad del Nivel de Agua – Pozo MMA-02**



*Fuente: Elaboración Propia.*

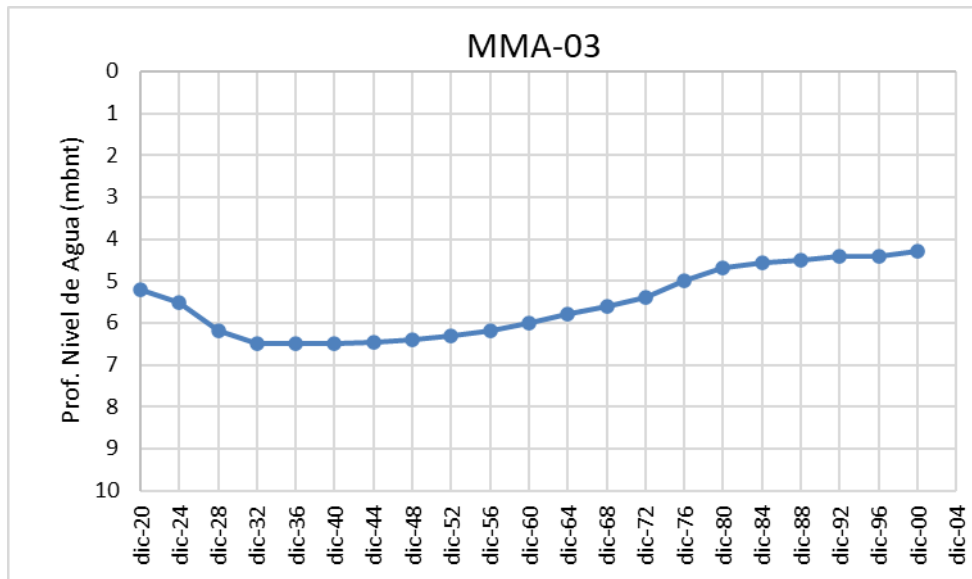


**Figura 5: Cota de Nivel de Agua – Pozo MMA-03**



*Fuente: Elaboración Propia.*

**Figura 6: Profundidad del Nivel de Agua – Pozo MMA-03**



*Fuente: Elaboración Propia.*