



INFORME TECNICO

CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA SISTEMA ACUÍFERO CIÉNAGA REDONDA

INFORME Rev 0

Preparado para

Compañía Minera Maricunga (CMM)
Una empresa Kinross

09 de Junio de 2015

Preparado por
HIDROMAS LTDA



TABLA DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Aspectos Generales.....	1
1.2 Metodología de Trabajo.....	1
1.3 Objetivos del Informe.....	2
2. ZONA DE ESTUDIO.....	3
2.1 Cuenca Salar de Maricunga.....	3
2.2 Subcuenca Ciénaga Redonda.....	4
2.3 Sector del Campo de Pozos Pantanillo.....	5
3. ZONAS DE INTERÉS AMBIENTAL.....	7
3.1 Ubicación de Humedales.....	7
3.2 Extensión Espacial de Sistemas de Humedales.....	8
3.3 Representación Esquemática de la Hidrodinámica en el Sistema de Humedales.....	9
3.3.1 <i>Humedal Pantanillo</i>	9
3.3.2 <i>Humedal Valle Ancho</i>	9
3.3.3 <i>Humedales Barros Negros y Ciénaga Redonda</i>	10
3.4 Estado a la Fecha de la Fiscalización.....	10
3.4.1 <i>Humedal Pantanillo</i>	10
3.4.2 <i>Humedal Valle Ancho</i>	10
3.4.3 <i>Humedal Barros Negros</i>	11
4. CAMPO DE POZOS DE BOMBEO PANTANILLO.....	12
4.1 Pozos de Bombeo.....	12
4.2 Características Estratigráficas del Área.....	12
4.3 Propiedades Hidrogeológicas.....	12
4.3.1 <i>Pruebas de Bombeo en 1991</i>	12
4.3.2 <i>Pruebas de bombeo en 2010</i>	13
4.3.3 <i>Pruebas de bombeo en 2014</i>	16
4.4 Caudales de Bombeo en pozos de Producción RA-1 y RA-2.....	17
4.5 Niveles del Agua Subterránea en Pozos Históricos.....	18
4.6 Puntos de Control de Caudales en Humedal Pantanillo.....	18
4.7 Pozos de Monitoreo y sus Características.....	19
4.8 Niveles del Agua Subterránea en Pozos de Monitoreo.....	19

5. BALANCE HÍDRICO EN CUENCAS APORTANTES A HUMEDALES.....	23
5.1 Aspectos Generales.....	23
5.2 Recarga por Cuencas Aportantes.....	23
5.3 Descargas por Consumo en Humedales.....	26
5.4 Balance Hídrico en Condición Natural.....	27
6. ANALISIS DE EFECTOS DEL BOMBEO EN SISTEMA ACUÍFERO CIÉNAGA REDONDA.....	28
6.1 Pozos de Monitoreo de Interés.....	28
6.2 Tiempos de Viaje en sentido Sur – Norte (Humedal Valle Ancho).....	28
6.2.1 Aspectos Generales.....	28
6.2.2 Situación Base.....	29
6.2.3 Análisis de Sensibilidad.....	30
6.2.4 Conclusiones Preliminares.....	31
6.3 Tiempos de Viaje en sentido Norte - Sur (Laguna Negro Francisco).....	31
6.4 Balance Hídrico en Situación con Bombeo.....	32
7. CONCLUSIONES.....	33
8. INFORMACIÓN DISPONIBLE.....	34



Carlos Espinoza C.
Ingeniero Civil, Ph.D.
Representante Legal HIDROMAS

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1 Cuenca Aportante Salar de Maricunga
Figura 1.2 Ubicación de Pozos de Bombeo y Distancia Aproximada a Vega Pantanillo.
- Figura 3.1 Ubicación de los humedales en la Quebrada Ciénaga Redonda
Figura 3.2 Ubicación y nombres de los humedales en la zona de estudio según SMA
Figura 3.3 Comparación de Nombres Utilizados para Humedal Pantanillo
Figura 3.4 Comparación de Nombres Utilizados para Humedal Valle Ancho
Figura 3.5 Comparación de Nombres Utilizados para Humedal Barros Negros
Figura 3.6 Comparación de Nombres Utilizados para Humedal Ciénaga Redonda
Figura 3.7 Extensión Espacial y Unidades de Vegetación Humedales Pantanillo y Valle Ancho
Figura 3.8 Extensión espacial y unidades de vegetación Humedales Barros Negros y Ciénaga Redonda
Figura 3.9 Representación esquemática de la Hidrodinámica del Humedal Pantanillo
Figura 3.10 Representación esquemática de la Hidrodinámica del Humedal Valle Ancho
Figura 3.11 Representación esquemática de la Hidrodinámica Humedales Barros Negros y Ciénaga Redonda
- Figura 4.1 Ubicación de Pozos de Bombeo y Distancia Aproximada a Vega Pantanillo.
Figura 4.2 Correlación estratigráfica basada en niveles de limo-arcilla presente en pozos de bombeo
Figura 4.3 Caudales de Bombeo desde Pozos RA-1 y RA-2 (2008 a 2014)
Figura 4.4 Niveles de Agua Subterránea en Campo de Pozos Pantanillo (producción y observación)
Figura 4.5 Ubicación de Punto de Control de Aguas Superficiales en Humedal Pantanillo
Figura 4.6 Niveles Reportados en Informes de Monitoreo para Limnómetro L8 (P9)
Figura 4.7 Pozos de Monitoreo en el Sistema Pantanillo
Figura 4.8 Variación Temporal de Niveles de Agua Subterránea en Humedal Pantanillo (Vista A, Figura 4.7)
Figura 4.9 Variación Temporal de Niveles de Agua Subterránea en Humedal Pantanillo (Vista B, Figura 4.7)
Figura 4.10 Variación Temporal de Niveles de Agua Subterránea en Humedal Pantanillo (Vista C, Figura 4.7)
- Figura 5.1 Sector Z1 en Salar de Maricunga según DGA (2006)
Figura 5.2 Balance Hídrico Sector Z1
Figura 5.3 Cuencas Aportantes a los Humedales del sector Z1
Figura 5.4 Bandas de Altura en Cuencas Aportantes a Humedales
Figura 5.5 Balance Hídrico en Condición Natural
Figura 5.6 Variación Anual Precipitación Anual en Estación Pastos Grandes
Figura 5.7 Variación Anual Recarga Subcuenca Humedal Valle Ancho
- Figura 6.1 Pozos de Monitoreo de Interés en Eje de la Quebrada Ciénaga Redonda
Figura 6.2 Niveles de Agua Subterránea en Pozos de Monitoreo de Interés y Pozos de bombeo

- Figura 6.3 Comportamiento Histórico de Niveles en Campo de Pozos Pantanillo y Llegada del Efecto del Bombeo a RA-3
- Figura 6.4 Ubicación de Pozo de Bombeo Equivalente en el Campo de Pozos Pantanillo
- Figura 6.5 Ubicación del Frente de Descenso de Niveles en el Tiempo (TA: 333,6 m/año)
- Figura 6.6 Llegada Temprana del Efecto del Bombeo a RA-3
- Figura 6.7 Ubicación del Frente de Descenso de Niveles en el Tiempo (TA: 417 m/año)
- Figura 6.8 Ubicación del Frente de Descenso de Niveles en el Tiempo (TA: 667,2 m/año)
- Figura 6.9 Comparación de la Ubicación del Frente de Descenso de Niveles para Cada Tasa de Avance
- Figura 6.10 Comparación Niveles en Campo de Pozos Pantanillo con Precipitación en Estación DGA Pastos Grandes

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Aspectos Generales

Compañía Minera Maricunga (CMM) ha solicitado a HIDROMAS Ltda. un análisis técnico sobre el potencial efecto de la explotación histórica de las aguas subterráneas desde los pozos de bombeo RA-1 y RA-2, localizados en el sector de Pantanillo, al sur de la Quebrada de Ciénaga Redonda, afluente al Salar de Maricunga. En la zona se localiza un tercer pozo de bombeo, RA-3, el que no ha sido utilizado para explotación del acuífero sino sólo como pozo de observación. La ubicación general del Salar de Maricunga y de su cuenca aportante se presenta en la Figura 1.1, mientras que la ubicación específica del campo de pozos de bombeo se presenta en la Figura 1.2.

Los tres pozos de bombeo de CMM cuentan con una aprobación sectorial (derechos de aprovechamiento) que data desde el año 1992 y que alcanza un total de 258 l/s. La explotación de estos pozos de bombeo se ha desarrollado en el marco de diversas aprobaciones ambientales asociadas a la operación de la mina Maricunga y como promedio anual de los últimos 10 años la extracción real alcanza a 67 l/s, los que consideran la operación alternada de los pozos RA-1 y RA-2. Tal como se indicó previamente, el pozo RA-3, que también cuenta con derechos de aprovechamiento otorgados, sólo se ha ocupado para la medición de niveles de agua subterránea y para el desarrollo de pruebas de bombeo de corta duración en él.

1.2 Metodología de Trabajo

Para la preparación de este documento se ha utilizado información contenida en diversos documentos previamente desarrollados en el área de estudio, así como información de monitoreo ambiental levantada periódicamente por Compañía Minera Maricunga.

La información disponible ha sido procesada de manera integrada, utilizando un enfoque de tipo conceptual para analizar la expansión de los efectos del bombeo de los pozos actualmente en explotación (RA-1 y RA-2).

De esta manera, información de niveles de agua subterránea en diversos pozos, dos de ellos actualmente en explotación y otros de observación, ha permitido analizar aspectos como el avance de los efectos de bombeo en el acuífero cercano a los pozos de bombeo y se ha podido estimar la velocidad de movimiento del cono de depresión en condiciones promedio así como también en condiciones más conservadoras.

1.3 Objetivos del Informe

El principal objetivo de este documento es verificar, mediante la información disponible, los efectos que la extracción de aguas subterráneas por parte de los dos pozos de bombeo en operación, RA-1 y RA-2, han generado, particularmente respecto al descenso de los niveles de agua subterránea, en el área de influencia de dichos pozos (sector de Pantanillo), descartando luego que dicha extracción haya tenido la posibilidad de alcanzar sectores más alejados como el Humedal de Valle Ancho y la Laguna Negro Francisco.

Esto último debido a la naturaleza misma de la explotación del agua subterránea, que considera una mezcla de explotación de la recarga directa hacia el sector acuífero, así como el consumo de almacenamiento que se manifiesta en descensos de los niveles de agua subterránea. De esa forma, la expansión de los efectos del bombeo (descensos de los niveles de agua subterránea) es paulatina y gradual no generándose efectos inmediatos en cuencas o sectores más alejados desde los pozos de bombeo ya que en los sectores intermedios existen fuentes de recarga intermedia que van regulando y conteniendo el avance del cono de depresión.

En el caso particular de la explotación de los pozos de bombeo RA-1 y RA-2 existen fuentes de recarga como el río Astaburuaga y las cuencas intermedias entre el sector de Pantanillo y Valle Ancho, las que son parte de esta evolución dinámica de un sistema acuífero real.

2. ZONA DE ESTUDIO

2.1 Cuenca Salar de Maricunga

Tal como se señala en DGA (2006) la cuenca del salar de Maricunga es la segunda cuenca cerrada más grande de la Tercera Región, después de la cuenca del Salar de Pedernales, sin embargo, su delimitación hidrológica presenta ciertas incertidumbres en su parte oriental. En el Balance Hídrico Nacional de 1987 se establece sobre la base de cartografía IGM (escala 1:500.000) un área total de 2.620 km², mientras que sobre la base de información topográfica digital dispuesta por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), con una resolución de escala 1:100.000, el área obtenida alcanza los 2.550 km². Información incorporada en DGA (2009) indica que la superficie de la cuenca asciende a 2.195 Km².

La hoya de Maricunga está inserta en la Puna de la Región de Atacama, tal como se observa en la Figura 1.1, y tiene una forma alargada en dirección norte – sur, angostándose desde la mitad hacia el sur para terminar en punta en el cerro Dos Hermanas. La depresión donde se emplaza el salar se encuentra en el centro-norte de su perímetro y está flanqueada por escarpados cerros al este y oeste, desde donde nacen varias quebradas de poca importancia. Tal como se indicó anteriormente, la cuenca de Maricunga es de tipo endorreica y en su zona terminal contiene un salar tipo playa con numerosos cuerpos de agua salinos. La evaporación desde las zonas húmedas y lagunas cierra el balance hidrológico de la cuenca, no existen antecedentes que indiquen lo contrario.

Las principales características morfológicas y climatológicas del salar son:

- altura de salar: 3.760 msnm
- superficie del salar: 145 km²
- superficie de las lagunas: 6 km² (0,15 km² para la laguna Santa Rosa)
- precipitaciones: 120 mm/año
- evaporación potencial: 1200 mm/año
- temperatura media: 4°C

La geología de la cuenca es una variedad de formaciones volcánicas, rocas plutónicas y terrenos sedimentarios. El salar es una costra de halita (NaCl) y yeso (CaSO₄.H₂O) con pequeñas lagunas generalmente adyacentes a la orilla. Los principales aportes de aguas superficiales al salar están dados por 7 arroyos ubicados entre 4000 y 4500 m de altura y que se infiltran aguas abajo, alimentando napas subterráneas.

La longitud mayor de la cuenca (N-S) es de aproximadamente 85 km y su mayor ancho (O-E) es de unos 45 km en el centro de la cuenca. La mayor elevación de Maricunga es el cerro Tres Cruces, en el límite con Argentina, con 6.749 msnm, mientras la elevación menor es de 3.738 msnm y se encuentra en el

salar. La altura media de la cuenca es de 4.295 msnm. Esta unidad está limitada al oeste, sur y norte por estratovolcanes con diverso grado de preservación, donde se encuentra a 4.710 msnm la cumbre del Cerro de la Sal y a 6.052 msnm la del Volcán Copiapó. Al este la cuenca limita con la Cordillera de Claudio Gay, cuyas máximas elevaciones llegan a los 5.181 msnm, mientras al sudeste coincide con el límite Chile- Argentina.

Relieves de erosión se desarrollan alrededor del salar formando zonas topográficamente más elevadas como cerros, cordones montañosos y sierras. Abundan los centros volcánicos de gran tamaño, con forma cónica y distintos grados de preservación. Las quebradas se desarrollan en las laderas de los cordones montañosos y sierras, con una marcada orientación N-S preferencial. Una importante unidad de acumulación aluvial es representada por el extenso Llano de Ciénaga Redonda. En la zona del salar, SERNAGEOMIN (1997) reconoce una laguna salobre central que separa facies cloruradas en el noroeste, de facies boratadas y sulfatadas hacia el sureste.

La cuenca superficial al Salar de Maricunga se divide en 23 subcuencas (DGA, 2009), que representan las subáreas aportantes a la depresión más la depresión misma en que se encuentra el salar. Los tributarios más importantes son el Río Lamas por el este y Ciénaga Redonda por el sur, que encauza algunos cursos intermitentes de agua debido a aportes de lluvias esporádicas y fusión nival de las altas cumbres que lo rodean, permitiendo el desarrollo de vegas.

La zona de aporte más relevante al Salar de Maricunga es la subcuenca de Ciénaga Redonda, que ocupa el sur de la hoya de Maricunga. Otro afluente importante al Salar de Maricunga es la depresión es el Río Lamas, cuyas aguas se infiltran al norte del Llano de Ciénaga Redonda. Al sur del salar se encuentra la Laguna Santa Rosa, que se alimenta de los afloramientos de agua subterránea, y que se desagua a través de un curso superficial que corre por el borde poniente del salar en forma permanente, hasta la laguna que está casi en el centro de la costra. Otras pozas de menor importancia se encuentran en los bordes del salar, tanto por el este como por el oeste, alimentadas del mismo modo por afloramientos subterráneos (Risarcher et al, 1999; DGA, 2009).

2.2 Subcuenca Ciénaga Redonda

La Subcuenca Ciénaga Redonda se ubica en el altiplano de la Región de Atacama, a la altura de la ciudad de Copiapó, cercano a la frontera internacional, a 4.000 msnm. Ésta se encuentra contenida dentro de la cuenca Salar de Maricunga, limitando al Este con la frontera internacional, al Oeste con la cordillera Claudio Gay, al Sur con la Pampa Valle Ancho y al norte con la desembocadura de la Quebrada Ciénaga Redonda, experimentado un escurrimiento subterráneo de dirección Sur-Norte.

La subcuenca de Ciénaga Redonda tiene una extensión aproximada de 857 km² (DGA, 2006) y aporta su escorrentía al Salar de Maricunga desde el sureste. Su red de drenaje posee una quebrada central de recorrido norte -sur conformado por un angosto valle central de algunos cientos de metros y aproximadamente 35 kilómetros de largo, que se desarrolla entre el límite hidrológico con la cuenca del Negro Francisco y su desembocadura a la cubeta terminal de la cuenca de Maricunga.

El escurrimiento por la quebrada es intermitente, con sectores secos producto de la infiltración y sectores con escurrimiento superficial debido al afloramiento de parte de la recarga que no puede ser conducida por el acuífero. En estas singularidades hidrogeológicas, de origen estructural y litológico, se generan tramos con escurrimiento superficial permanente, en donde aparecen humedales que constituyen una importante fuente de evapotranspiración y que actúan como reguladores de la escorrentía total disponible hacia aguas abajo. Los principales aportes superficiales hacia la quebrada corresponden a los riachuelos Barros Negros y Villalobos, con caudales promedios que alcanzan los 74 y 42 l/s respectivamente.

Un aspecto particularmente relevante para el balance hídrico de la subcuenca de Ciénaga Redonda, es su delimitación hidrogeológica con la cuenca de la Laguna del Negro Francisco. La quebrada del río Astaburuaga, perteneciente a la cuenca vecina, posee una dirección de drenaje de sureste a noreste hacia la cabecera de Ciénaga Redonda, sin embargo, los flujos superficiales del río son desviados en su desembocadura en dirección sur, hacia la Laguna del Negro Francisco.

Tal como se indica en DGA (2006), esta delimitación hidrológica es producto de la configuración topográfica generada por la acumulación preferencial de los flujos masivos de alta energía eyectados por la quebrada Astaburuaga sobre la cabecera de Ciénaga Redonda.

Desde el punto de vista geoquímico, los flujos superficiales salientes desde Ciénaga Redonda hacia la cubeta del salar, tienen vía evolutiva sulfatada neutra y son coherentes con la composición litológica de su cuenca superficial predominantemente volcánica. No obstante, se destaca el hecho que la vertiente occidental sea la que aporta la mayor parte del SO₄. La vertiente oriental, compuesta por rocas volcánicas más puras, produce aguas carbonatadas y sulfatadas alcalinas, con bajo y moderado contenido de SO₄ respectivamente.

2.3 Sector del Campo de Pozos Pantanillo

El campo de pozos Pantanillo es la fuente actual de abastecimiento de agua de procesos de la Mina Maricunga y se encuentra ubicado cerca de la división topográfica entre Quebrada Ciénaga Redonda al norte y el Río Astaburuaga al sur, tal como se muestra en la Figura 1.2.

En Ciénaga Redonda la red de drenaje fluye hacia el norte en dirección al Salar de Maricunga. Por su parte, en Río Astaburuaga la red de drenaje fluye hacia el suroeste en dirección a la Laguna del Negro Francisco. Tanto la Laguna del Negro Francisco como el Salar de Maricunga, constituyen sumideros terminales de sus respectivas cuencas (cuencas endorreicas) en los cuales descargan todos los afluentes y que salen del sistema debido a evaporación/evapotranspiración.

3. ZONAS DE INTERÉS AMBIENTAL

3.1 Ubicación de Humedales

Existen diversos sistemas de humedales que se ubican a lo largo de la Quebrada Ciénaga Redonda, la que drena hacia el norte, desde la divisoria de aguas con el Río Astaburuaga, hasta desembocar en el Salar de Maricunga.

Tal como se indica en la Figura 3.1, los humedales localizados en el área se ubican, desde sur a norte, en el siguiente orden:

- Pantanillo
- Valle Ancho
- Barros Negros
- Ciénaga Redonda.

Por otro lado, la distancia aproximada entre el campo de pozos Pantanillo y cada uno de los humedales, medida desde el pozo más cercano (RA-1), siguiendo el eje central de la quebrada hasta el límite norte de cada humedal, se presenta en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1
Distancia Aproximada entre Campo de Pozos (RA-1) y Humedales

Humedal	Distancia (km)
Pantanillo	0,8
Valle Ancho	7,0
Barros Negros	16,0
Ciénaga Redonda	32,0

Fuente: Elaboración propia

Respecto al nombre que reciben los sistemas humedales, en el análisis de antecedentes desarrollado para este informe se han consultado diversos estudios (Tabla 3.2), en los cuales se utilizan diferentes nomenclaturas o referencias. Por lo anterior, y para mantener un orden en el análisis, se mantendrá la nomenclatura utilizada en el Informe de Fiscalización Ambiental DFZ-2015-8-111-RCA-IA de la SMA para referirse a los humedales, lo cual se presenta en la Figura 3.2.

Tabla 3.2
Estudios analizados para el desarrollo del informe.

ID	Estudio
A	Informe de Fiscalización Ambiental DFZ-2015-8-111 -RCA-IA. SMA, 2015.
B	Informe Técnico de Estado de Humedales Pantanillo y Valle Ancho en la Región de Atacama. CONAF, 2015 (antecedentes contenidos en informe SMA).
C	Análisis de la Tendencia Histórica de Vegetación Azonal Hídrica sector Ciénaga Redonda, Barros Negros y Pantanillo. Altiplano Región de Atacama. SAG, 2013.
D	Caracterización de Humedales Altoandinos para una Gestión Sustentable de las Actividades Productivas del Sector Norte Del País. CIREN, 2013.
E	Varios estudios y reportes de Golder Associates para CMM.

Fuente: Elaboración Propia

Adicionalmente, se presentan cuatro figuras comparativas con los nombres utilizados en los estudios indicados en la Tabla 3.2 (Figuras 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6).

3.2 Extensión Espacial de Sistemas de Humedales

La definición de la extensión espacial de cada uno de los humedales está dada por lo determinado en el informe técnico “Estudio Multitemporal de la Vegetación Azonal Hídrica, Sectores Pantanillo, Valle Ancho, Barros Negros y Ciénaga Redonda”, desarrollado por Biota Ltda. en mayo de 2015.

En la Tabla 3.3 se resume la superficie de cada humedal, mientras que su extensión espacial se presenta en las Figura 3.7 y 3.8.

Tabla 3.3
Superficie de los Humedales Pantanillo, Valle Ancho, Barros Negros y Ciénaga Redonda

Humedal	Sector	Unidades de Vegetación	Superficie (ha)	Superficie Total Humedal (ha)
Pantanillo	Pantanillo Norte	5	12,2	21,8
	Pantanillo Sur	2	9,6	
Valle Ancho	Valle Ancho Norte	7	25,4	241,9
	Valle Ancho Centro	9	178,2	
	Valle Ancho Sur	5	38,3	
Barros Negros	Barros Negros Norte	6	28,5	146,3
	Barros Negros Sur	6	117,8	
Ciénaga Redonda	Ciénaga Redonda	6	69,0	69,0

Fuente: Elaboración propia a partir de informe técnico Biota, 2015

3.3 Representación Esquemática de la Hidrodinámica en el Sistema de Humedales

A partir de fotointerpretación de imágenes disponibles se ha preparado una descripción simplificada de la hidrodinámica de los humedales.

Se destacan para cada humedal los potenciales aportes superficiales (flechas azules), las posibles zonas de afloramiento e infiltración y la salida de flujo desde el hacia aguas abajo (flecha verde).

3.3.1 Humedal Pantanillo

En Pantanillo Sur (Figura 3.9) se identifica en el límite sur la zona de afloramiento de aguas subterráneas, donde el humedal también recibe los aportes superficiales intermitentes de las quebradas aportantes en la cabecera de la cuenca de la quebrada Ciénaga Redonda. Además, existe en este sector un aporte lateral de aguas superficiales que aflora desde el costado noroeste del humedal.

Desde el centro de humedal hacia aguas abajo se evidencia que hubo en algún periodo escurrimiento superficial en el humedal que drenó hacia el sector norte y en el límite norte también se evidencia que en algún momento hubo espejos de agua o lagunas en el humedal, lo que tiene sentido ya que en esa zona del humedal se encuentra el Limnómetro L8 o también llamado P9 en los informes de monitoreo ambiental.

Para el sector Pantanillo Norte (Figura 3.9) se evidencia una zona de afloramiento donde hubo una unidad vegetacional que a la fecha está seca. También se identifica un aporte lateral de aguas desde el oeste y el desarrollo de vegetación asociado a éste. Al llegar al valle, este aporte lateral genera pequeños cursos superficiales que terminan por infiltrarse. Dado el estado de la vegetación, el origen del aporte lateral y la hidrodinámica, esta porción del humedal no correspondería asociarlo al sistema Pantanillo, que tendría otro respaldo hidrogeológico.

3.3.2 Humedal Valle Ancho

En la vista A de la Figura 3.10 se destaca en rojo la cuenca aportante al humedal de Valle Ancho, la cual tiene un área aproximada de 135,9 Km². Además, se indican los aportes que recibe el humedal, destacando el aporte desde la cuenca del humedal Pantanillo y el aporte de quebradas laterales. Se puede observar que en el costado este del humedal hay una barrera topográfica que no permitiría el aporte lateral directo desde las quebradas laterales adyacentes.

En la vista B de la Figura 3.10 se puede observar con más detalle la extensión del humedal, la barrera topográfica mencionada, las zonas de afloramiento e infiltración, así como la zona de llegada del aporte desde Pantanillo y la salida aguas abajo hacia Barros Negros.

3.3.3 Humedales Barros Negros y Ciénaga Redonda

La hidrodinámica de estos humedales es bastante similar a los anteriores, destacando zonas de afloramiento, aportes al sistema desde aguas arriba y quebradas laterales y zonas de infiltración de aguas subterráneas. Se evidencian algunas zonas con escurrimiento superficial intermitente. Todo lo anterior se destaca en la Figura 3.11.

3.4 Estado a la Fecha de la Fiscalización

Según el informe de fiscalización de la SMA, se realizó una inspección en terreno el día 04 de marzo de 2015, donde se evaluó el estado de la vegetación en distintos humedales del corredor biológico Pantanillo - Ciénaga Redonda. Desde el punto de vista hídrico, los principales resultados de la inspección se resumen a continuación.

3.4.1 Humedal Pantanillo

Sector sur

- El humedal se encontró seco, se encontraba implementada y operando la medida de mitigación.
- Se identificó un humedal cercano alimentado por una quebrada lateral.

Sector norte

- El humedal se encontró en la misma situación de degradación que el sector sur de Pantanillo (seco).
- Se identificaron dos humedales cercanos alimentados por quebradas laterales. En estos humedales la vegetación se encontró en buenas condiciones.

3.4.2 Humedal Valle Ancho

- En el sector más cercano a Pantanillo Norte, se constató que la vegetación se encuentra seca al estado de mantillo.
- Al norte del sector anterior se constató la presencia de un humedal seco, las condiciones hídricas del sitio son: sin espejo de agua, por lo que el sustrato que debiera estar cubierto con agua se observó cubierto de una costra salina.

- Al oeste del humedal se constató la presencia de un humedal seco, las condiciones hídricas del sitio son sin espejo de agua, por lo que el sustrato que debiera estar cubierto con agua se observó cubierto de una costra salina.

3.4.3 Humedal Barros Negros

- Las condiciones hídricas de los sectores revisados en el humedal son sin espejo de agua, por lo que el sustrato que debiera estar cubierto con agua se observó cubierto de una costra salina.

4. CAMPO DE POZOS DE BOMBEO PANTANILLO

4.1 Pozos de Bombeo

Los pozos de bombeo o campo de pozos Pantanillo se encuentran ubicados al norte del Río Astaburuaga, en la cabecera de la Quebrada de Ciénaga Redonda, la que drena hacia el norte en dirección al Salar de Maricunga (Figura 4.1).

El campo de pozos está compuesto por los pozos RA-1, RA-2 y RA-3, donde solo los dos primeros están habilitados y se utilizan para abastecer los procesos de la faena de Mina Maricunga. El pozo RA-3 no se encuentra habilitado y se ha utilizado hasta la fecha como pozo de monitoreo u observación. Los tres pozos tienen derechos de aguas constituidos por un total 258 l/s, pero ambientalmente está autorizada la extracción máxima de 95 l/s, como promedio anual (RCA N°004/2004).

En línea recta al límite norte de la vega Pantanillo, los pozos de bombeo se encuentran a una distancia aproximada de 2.470 metros (RA-2), 748 metros (RA-1) y 400 metros (RA-3).

4.2 Características Estratigráficas del Área

Las características estratigráficas de los pozos de bombeo se presentan en la Figura 4.2. Según lo indicado en el EIA Proyecto Minero Refugio (1994), al analizar la estratigrafía de los pozos se puede ver una zonación de sedimentos finos (limos y arcillas) en el sentido vertical. Desde los 39 a 47 metros de profundidad, el porcentaje de finos es menor o igual a 10%. Bajo esta profundidad los sedimentos finos alcanzan hasta un 35%.

De acuerdo a la profundidad de los pozos, los sedimentos de Pampa Pantanillo tienen un espesor máximo reconocido de 100 metros. Están formados por gravas y arenas gruesas, que presentan grados moderados de redondeamiento y esfericidad, el carácter anguloso a subanguloso de la formación clástica mayor indica un corto transporte. La matriz de estos rellenos suele estar constituida por arena gruesa a fina y, en pequeña cantidad, por limo y arcilla.

4.3 Propiedades Hidrogeológicas

4.3.1 Pruebas de Bombeo en 1991

Una vez finalizados los pozos RA-1 y RA-2 en 1991 (SITAC, 1992), se realizaron pruebas de bombeo que se prolongaron por periodos que fluctuaron entre 12 y 48 horas. La prueba de bombeo del pozo RA-2 tomó de 12 a 24 horas. Durante estas pruebas se midieron los niveles de agua en pozos de bombeo

individuales. No se dispone de mediciones en los pozos de observación, motivo por el cual no fue posible determinar un valor para el coeficiente de almacenamiento ni para el coeficiente de almacenamiento específico.

En la Tabla 4.1 se resume la transmisividad del acuífero según lo determinado en las pruebas de bombeo. Los valores de transmisividad indican un acuífero altamente permeable. Los mayores valores de transmisividad se determinaron en los pozos RA-1 y RA-2 y oscilan entre los 4.000 y 6.600 m²/d. La prueba de bombeo en el pozo RA-3 dio como resultado un valor menor de conductividad hidráulica. Esto puede significar que el material del depósito del abanico aluvial es de grano más fino y pudo ser depositado por algún tributario originado en la zona este.

Tabla 4.1
Resultados de las pruebas de bombeo realizadas por SITAC en 1991.

Pozo de Prueba	Pozo de Observación	Tipo de Prueba	Tasa de Bombeo (L/s)	Duración Bombeo (horas)	Transmisividad (m ² /d)	Coficiente Almacenamiento Específico (-)
RA-1	RA-1	Recuperación escalonada	73	17	4,216	nd
RA-1	RA-1	Tasa constante de bombeo	110	48	1,932	nd
RA-2	RA-1	Recuperación tasa constante	110	48	3,550	nd
RA-2	RA-2	Recuperación escalonada	68	12	4,827	nd
RA-2	RA-2	Tasa constante de bombeo	105	48	6,640	nd
RA-2	RA-2	Recuperación tasa constante	105	48	4,150	nd
RA-3	RA-3	Recuperación escalonada	42	12	1,387	nd
RA-3	RA-3	Tasa constante de bombeo	45	24	614	nd
RA-3	RA-3	Recuperación tasa constante	45	24	1,342	nd

Fuente: Memorando técnico 25, del 26 de octubre de 2010, preparado por Golder Associates para Kinross Gold

4.3.2 Pruebas de bombeo en 2010

Se instalaron cinco pozos de monitoreo (RPG-32, RPG-38, RPG-21c, RPG-22, RPG31) y un pozo de prueba (RPG-21) para evaluar las características de los materiales de sub-superficie en el área del campo de

pozos Pantanillo y para monitorear los niveles de agua subterránea durante las pruebas de bombeo en el pozo de prueba RPG-21.

Se realizó una prueba de bombeo a caudal variable para evaluar la producción, descenso del pozo y para seleccionar un caudal de bombeo a largo plazo para la prueba de bombeo a caudal continuo. La prueba consistió de 4 etapas (60 min c/u) con caudales de bombeo de 20, 40, 60 y 73 l/s. El descenso aumentó en forma rápida inmediatamente después del inicio de cada etapa, en gran parte por las pérdidas del pozo, antes de establecer una tendencia continua para el final de cada etapa. No se lograron condiciones de régimen permanente durante el ensayo a caudal variable. Después de revisar los resultados de esta prueba, se decidió bombear el pozo de prueba a un caudal de 50 l/s durante la prueba a caudal constante.

Se realizó una prueba de bombeo a caudal constante en el pozo RPG-21, cuyo caudal de bombeo fue 50 l/s, la duración de la prueba fue 5.815 minutos (4 días), el nivel estático del agua fue 23,8 metros bajo la superficie del suelo y el descenso máximo en el pozo de bombeo fue 5,7 metros.

El pozo RPG-21 está constituido en un acuífero aluvial heterogéneo adyacente al Río Astaburuaga y al sur del campo de pozos Pantanillo. El acuífero es de espesor y extensión lateral variable y está limitado por el basamento rocoso. El río Astaburuaga provee una fuente de recarga al acuífero vía infiltración directa desde su cauce, lo que limitaría la expansión del cono de depresión producto de los bombeos en RA-1 y RA-2. La distribución de la recarga del acuífero es una función de las condiciones geológicas que sólo se conocen a escala localizada a partir de las perforaciones individuales.

La Tabla 4.2 presenta un resumen de los análisis de las pruebas de bombeo. El rango de valores de transmisividad es representativo de la unidad geológica a la profundidad en que se encuentra el ranurado del pozo, la heterogeneidad del acuífero, la influencia de los bordes de baja permeabilidad (bordes de valle) y de los límites de recarga (río Astaburuaga).

Las pruebas de bombeo realizadas en el pozo RPG-21 indican lo siguiente:

- La transmisividad del acuífero aluvial no consolidado en el área vecina al RPG-21 se estima aproximadamente en 4.000 m²/día;
- El coeficiente de almacenamiento se estima aproximadamente en 1x10⁻³. Esto representa un acuífero semi-confinado;
- Los niveles de agua en los pozos RPG-22 y RPG-31 ubicados a 3 y 5 km respectivamente del pozo RPG-21 no muestran respuesta aparente al bombeo;
- El agua turbia de descarga al inicio de la prueba de bombeo indicó que el pozo de prueba no estaba completamente desarrollado previo a la prueba de bombeo y que se produjo un desarrollo adicional

durante la prueba de bombeo. Por lo tanto, los datos de nivel de agua del pozo de prueba durante el bombeo son menos confiables que los datos del pozo de observación;

- Se observó un borde de baja permeabilidad, indicativo de un acuífero limitado, en los pozos de observación RPG-32 y RPG-21c luego aproximadamente de un día de bombeo;
- En el pozo de observación RPG-38, ubicado a 90 m del canal principal del Río Astaburuaga, se observó un límite indicativo de recarga del acuífero. Un deshielo produjo un aumento en el caudal del río durante la prueba de bombeo es probablemente responsable de las condiciones de recarga. Esta recarga puede haber actuado para cubrir otros efectos límites en los datos de nivel de agua de este pozo;
- Los gráficos de los pozos de observación del periodo previo al bombeo muestran una tendencia al descenso en los niveles del agua subterránea recolectada de RPG-32, RPG-21c y RPG-22 y una tendencia al ascenso en los niveles de RPG-38. Estas observaciones sugieren una recarga local de agua subterránea en los alrededores del pozo RPG-38;
- El radio de influencia de la prueba de bombeo fue aproximadamente de 2 a 3 km.

Tabla 4.2
Resumen de las Pruebas de Bombeo

Análisis Tiempo vs. Descenso						
Punto de observación ¹	Distancia a Pozo de bombeo (m)	Período de análisis ² (min)	Pendiente del descenso Δs (m)	Transmisividad (m ² /d)	Almacenamiento (adimensional)	Prueba de la unidad hidrogeológica
RPG-21	0,5	1,500 – 5,800	0,27	2,928	N/A	Arena y grava no consolidada
RPG-32	20	100 – 1,200	0,15	5,270	8,2 x 10 ⁻⁸ (Nota 3)	Arena y grava no consolidada / techo de roca
RPG-38	331	30 – 450	0,55	1,437	3,2 x 10 ⁻⁴	Arena y grava no consolidada / techo de roca
RPG-21c	601	100 – 1,200	0,07	11,293	9,8 x 10 ⁻⁴	Arena y grava no consolidada / techo de roca
Media geométrica				3,980		

Análisis Distancia vs Descenso:

Transmisividad calculada: 2,000 m²/d (Nota 4)

Coefficiente de almacenamiento calculado: 3,7 x 10⁻³

Nota:

- 1) En los pozos RPG-22 y RPG-31 no se observe descenso debido al bombeo del pozo RPG-21, y por lo tanto, estos pozos no fueron considerados en el análisis de la prueba de bombeo.
- 2) Desde el comienzo de la prueba de bombeo a caudal constante.
- 3) El valor del almacenamiento no es representativo, porque fue afectado por pérdidas de carga.
- 4) La transmisividad fue estimada en el análisis de distancia vs. descenso debido a los efectos de pérdidas de carga en los pozos RPG-21 y PRG-32.

Fuente: Memorando técnico 24, del 20 de octubre de 2010, elaborado por Golder Associates para Kinross Gold

4.3.3 Pruebas de bombeo en 2014

Durante el periodo comprendido entre el 23 de marzo y el 8 de abril de 2014 se desarrollaron dos pruebas de bombeo en el pozo RA-3. Los objetivos de estas pruebas fueron determinar las propiedades hidráulicas del acuífero. La primera de las pruebas fue de gasto variable (15, 30, 45 y 62 l/s), con la cual fue posible definir el caudal de 45 l/s para sostener durante la prueba de gasto constante. Esta última fue llevada a cabo durante 7 días, a partir del 25 de marzo hasta el 1 de abril, momento en que se detiene el bombeo y se da inicio a la prueba de recuperación, durante otros 7 días.

Para la obtención de los datos, se realizó un monitoreo continuo en 13 puntos de observación, además del propio pozo de bombeo; de forma automática, mediante la instalación de transductores de presión en dichos puntos, y de forma manual, usando sondas piezométricas para la medición de niveles de agua.

La prueba de bombeo a caudal variable se realizó con el objetivo de evaluar la producción y el descenso del pozo y de esta forma seleccionar un caudal de bombeo a largo plazo para la prueba de bombeo a caudal constante. Además, mediante esta prueba fue posible estimar la eficiencia del pozo frente al bombeo. Lo anterior, dado que la única prueba de bombeo en el pozo RA-3 data del año 1991 y no fue realizada ni supervisada por Compañía Minera Maricunga.

La prueba de bombeo a caudal constante se desarrolló con posterioridad a la prueba de caudal variable, una vez que el agua en el pozo de prueba y en el pozo de monitoreo más cercano se hubo estabilizado, dentro de un rango del 90% del espesor total saturado.

Con los valores obtenidos de éstas fue posible calcular parámetros hidráulicos del acuífero (transmisividad, coeficiente de almacenamiento y capacidad específica o “Specific yield” (Sy)) y el rendimiento de los pozos a largo plazo.

A consecuencia de la habilitación del pozo de producción y los pozos de monitoreo, el monitoreo de niveles y de propiedades hidráulicas se extiende a la unidad de depósitos aluviales. La definición del acuífero analizado, confinado o no confinado, se determina a partir del comportamiento de los niveles en los distintos pozos durante el bombeo. La presencia de un estrato de toba de menor permeabilidad en el pozo LNF-MW-05A, hace suponer la posibilidad de un acuífero confinado en profundidad.

A partir de las pruebas desarrolladas, fue posible determinar parámetros hidráulicos preliminares del acuífero en el entorno del pozo RA-3:

- Los valores de transmisividad calculados a partir de la prueba de bombeo en el sistema de agua subterránea compuesto por los depósitos aluviales oscilan entre 900 a 4.300 m²/día, en los pozos de monitoreo, con un valor medio de 1.600 m²/día para el pozo de observación de la prueba

- Los valores de coeficiente de almacenamiento representativos del sistema de agua subterránea aluvial son del orden de 6.2×10^{-4}
- Los valores de capacidad específica o “Specific Yield” (Sy) representativos del sistema de agua subterránea aluvial oscilan entre 0,3% y 18%. Si bien la variabilidad es alta, los valores se encuentran dentro de lo esperado para un acuífero de grava y arena entre 5% y 15%.

Además, a partir del análisis de los descensos de cada pozo de observación, fue posible concluir otras características del acuífero y su influencia sobre la vega. La característica más relevante es que es posible diferenciar dos acuíferos en el eje central del valle: Uno confinado inferior y otro no-confinado superior.

4.4 Caudales de Bombeo en pozos de Producción RA-1 y RA-2

A partir de la información entregada por CMM se dispone de información sobre los caudales medios anuales de los pozos de producción RA-1 y RA-2, entre los años 2005 y 2014, lo que se resume en la Tabla 4.3 y se presenta de manera gráfica en la Figura 4.3.

Tabla 4.3
Caudales de Bombeo a Nivel Promedio Anual (l/s)

AÑO	POZO RA-1	POZO RA-2	CAUDAL TOTAL
2005	51.6	0.0	51.6
2006	24.7	24.7	49.4
2007	29.7	29.7	59.4
2008	32.4	30.9	63.3
2009	34.0	36.8	70.8
2010	32.4	31.1	63.4
2011	44.5	29.4	73.9
2012	41.1	45.5	86.7
2013	39.4	36.6	76.0
2014	24.4	46.4	70.8

Fuente: Elaboración propia a partir de datos proporcionados por CMM

Se observa que la explotación ha sido alternada entre los pozos, donde el promedio para el periodo en RA-1 fue 35,4 l/s, en RA-2 fue 31,1 l/s y el promedio del sistema fue 66,5 l/s. A pesar de la alternancia en el bombeo, se observa que durante 2014 se ha bombeado casi el doble de caudal desde RA-2 respecto a RA-1.

4.5 Niveles del Agua Subterránea en Pozos Históricos

En la Figura 4.4 se observan los niveles históricos registrados en el Campo de Pozos Pantanillo. Para el periodo previo la suspensión temporal de la operación en la mina y chancado (1er semestre 2001) se observa un comportamiento similar en los niveles de los pozos. Durante el periodo de suspensión temporal se observa el mismo comportamiento en los niveles de los tres pozos (RA-1, RA-2 y RA-3), observando también variaciones cíclicas en los niveles que pueden deberse a efectos estacionales de recarga y descarga. Con el reinicio de la operación de CMM, en junio de 2005, dicho comportamiento cambia y se observa un efecto directo del bombeo en al menos dos de los pozos.

A partir de esa fecha, los pozos RA-1 y RA-2 comienzan a evidenciar un descenso de niveles siguiendo la misma tendencia (pendiente), a diferencia del pozo RA-3 que mantiene aproximadamente su nivel. Aproximadamente a fines del año 2009 y comienzos del año 2010 los niveles en el pozo RA-3 comienzan a descender siguiendo una tendencia similar a la que se observa previamente en los pozos de producción RA-1 y RA-2. El tiempo en el cual estos efectos se demoran en ocurrir se relacionan con la alternancia en la operación de los pozos de bombeo y en el consumo de aguas subterráneas contenidas en el acuífero (almacenamiento) y en la recarga hacia el acuífero inducida desde el río Astaburuaga.

4.6 Puntos de Control de Caudales en Humedal Pantanillo

De acuerdo a lo establecido en el programa de monitoreo del EIA Proyecto Minero Refugio (1994), en el humedal Pantanillo se instaló un Limnómetro para medir mensualmente, por lectura directa, el nivel de agua superficial y este punto se denominó como L8. A partir de la revisión de antecedentes, en particular de los informes de monitoreo semestrales, fue posible obtener las coordenadas del punto L8 y corroborar que en dichos informes se le denomina P9. En la Figura 4.5 se presenta la ubicación del Limnómetro L8 o punto P9.

Respecto al nivel de aguas superficiales medido en L8 (P9), el informe de fiscalización de la SMA reproduce en un gráfico los niveles reportados, datos que fueron corroborados con los informes de monitoreo y que se presentan en la Figura 4.6. La SMA indica que “se muestran los datos de seguimiento ambiental del nivel de agua en superficie en el humedal Pantanillo, medido a través del limnómetro L8 (“estaca verde”). A partir del año 2009 se incorporó un punto de medición adicional en el mismo sector, denominado “estaca naranja”. De la lectura se aprecia que desde el año 2001 hay frecuentes episodios secos y que el humedal se encuentra completamente seco desde comienzos del año 2005.”. Se debe mencionar que no fue posible obtener las coordenadas de la “estaca naranja”.

4.7 Pozos de Monitoreo y sus Características

En el sistema Pantanillo se ha instalado durante el tiempo una amplia red de monitoreo de niveles de agua subterránea, como se presenta en la Figura 4.7. En la Figura 4.7 se han identificado tres zonas de interés:

- Sección A en la que se observan los pozos de monitoreo localizados en las inmediaciones de la Vega Pantanillo
- Sección B que contiene los pozos de monitoreo hacia el sector norte de Ciénaga Redonda
- Sección C que contiene los pozos de monitoreo hacia el sur o río Astaburuaga

Inicialmente, con la construcción del campo de pozos en 1991, el pozo RA-3 no fue habilitado para bombeo, pero ha sido utilizado hasta la actualidad para el monitoreo del nivel del acuífero y se considera como punto histórico representativo del nivel de agua subterránea en el humedal Pantanillo.

En 2010, Golder Associates amplió la red de monitoreo construyendo los “pozos RPG” y entre 2013 y 2014 continuó ampliando la red de monitoreo con la construcción de los “pozos LNF-MW”. Este conjunto de pozos ha permitido ampliar la cobertura de medición de niveles en el área del Humedal Pantanillo y los sectores cercanos.

En general la información de niveles de agua subterránea sólo cubre una porción muy acotada de tiempo, a excepción de los pozos RPG-31, RPG-22, RPG-21C, RPG-32, RPG-21 y RPG-38, los que disponen de datos desde el año 2010. Las principales características de los pozos de monitoreo se presentan en la Tabla 4.4.

4.8 Niveles del Agua Subterránea en Pozos de Monitoreo

La variación temporal de niveles en los pozos de monitoreo se presentan en las Figuras 4.8, 4.9 y 4.10, para los pozos indicados en las vistas A, B y C de la Figura 4.7. En cada caso se presenta la información de niveles en términos de la profundidad del nivel de agua en cada pozo con respecto al nivel de terreno.

En general los cambios temporales en los niveles de agua subterránea en los nuevos pozos de monitoreo siguen los comportamientos del pozo de monitoreo RA-3, observándose en ellos el efecto de los pozos de bombeo RA-1 y RA-2.

En las Figuras 4.11 y 4.12 se observa el efecto directo del bombeo desde los pozos de producción RA-1 y RA-2 sobre los pozos de observación RPG-31 y RPG-21, localizados en los sectores de Vega Pantanillo y Sur del río Astaburuaga, respectivamente.

En el caso del pozo de observación RPG-31, localizado justo aguas abajo de la Vega Pantanillo Sur, los niveles de agua subterránea indicados en la Figura 4.11 muestran un descenso marcado durante el año 2012 el que posteriormente, al irse rebajando el caudal de bombeo del pozo más cercano (RA-1), se estabiliza e incluso comienza un proceso de recuperación. Eso indica que a partir del año 2013, los niveles de agua subterránea se estabilizan debido a la alternancia de los bombeos entre los dos pozos de extracción. El descenso del nivel de agua subterránea durante el año 2011, y su posterior recuperación hacia fines de ese año, se asocia a una prueba de bombeo realizada en el pozo RA-3.

En la Figura 4.12 se presentan los niveles en el pozo RPG-21, el que se localiza hacia el sector sur del área de Pantanillo, específicamente en las cercanías del río Astaburuaga. En esta figura se observa un descenso de los niveles de agua subterránea, seguidos por ascensos en períodos intermedios, todos los cuales se asocian al programa de bombeo de los pozos RA-1 y RA-2, pero principalmente al pozo más cercano a este punto de monitoreo, el pozo RA-2.

Tabla 4.4
Catastro de Pozos de Bombeo y Monitoreo en Sector Ciénaga Redonda

ID	Tipo	Este	Norte	Cota Terreno	Diámetro Perforación	Fecha Término	Largo Final
		(m)	(m)	(m)	(")		(m)
RA-1	Pozo Producción	496,407	6,965,389	4,252.00	16"		60.0
RA-2	Pozo Producción	495,499	6,963,820	4,264.00	16"		52.0
RA-3	Pozo Monitoreo	496,791	6,966,035	4,248.00	16"		102.0
LNF-MW-01a	Pozo Monitoreo	492,884	6,961,013	4,254.00	9 7/8"	14-10-2013	96.0
LNF-MW-01b	Pozo Monitoreo	492,896	6,960,997	4,254.00	9 7/8"	22-10-2013	21.0
LNF-MW-02	Pozo Monitoreo	489,415	6,958,158	4,215.00	9 7/8"	09-05-2013	62.0
LNF-MW-03	Pozo Monitoreo	496,330	6,966,173	4,240.00	9 7/8"	24-03-2013	48.0
LNF-MW-04	Pozo Monitoreo	496,544	6,966,352	4,238.00	9 7/8"	18-03-2013	50.0
LNF-MW-05A	Pozo Monitoreo	496,803	6,966,298	4,243.00	9 7/8"	07-03-2013	98.0
LNF-MW-05B	Pozo Monitoreo	496,812	6,966,291	4,243.00	9 7/8"	13-03-2013	22.4
LNF-MW-06	Pozo Monitoreo	499,320	6,971,344	4,183.00	9 7/8"	13-04-2013	50.0
LNF-MW-07	Pozo Monitoreo	497,769	6,969,744	4,201.00	9 7/8"	07-04-2013	100.0
LNF-MW-08	Pozo Monitoreo	497,292	6,969,187	4,207.00	9 7/8"	20-04-2013	50.0
LNF-MW-09	Pozo Monitoreo	495,708	6,961,878	4,289.00	9 7/8"	29-04-2013	73.0
LNF-MW-10	Pozo Monitoreo	496,778	6,966,040	4,249.00	10 7/8"	05-11-2013	90.0
LNF-MW-11	Pozo Monitoreo	497,495	6,969,465	4,196.00	11 7/8"	22-11-2013	49.0
LNF-MW-39	Pozo Monitoreo	496,757	6,966,710	4,232.00	7 7/8"	09-02-2014	9.0
LNF-MW-40	Pozo Monitoreo	496,673	6,966,494	4,237.00	7 7/8"	04-02-2014	18.0
LNF-MW-41	Pozo Monitoreo	496,467	6,966,262	4,238.00	7 7/8"	28-01-2014	18.8
LNF-MW-42	Pozo Monitoreo	496,292	6,966,192	4,238.00	7 7/8"	31-01-2014	16.0
LNF-MW-43	Pozo Monitoreo	496,403	6,966,154	4,239.00	7 7/8"	30-01-2014	20.0
LNF-MW-44	Pozo Monitoreo	496,733	6,966,605	4,235.00	7 7/8"	06-02-2014	9.0

Tabla 4.4
Catastro de Pozos en Sector Ciénaga Redonda

ID	Tipo	Este	Norte	Cota Terreno	Diámetro Perforación	Fecha Término	Largo Final
		(m)	(m)	(m)	(")		(m)
LNF-TW-01	Pozo Monitoreo	497,519	6,969,465	4,195.00	23 7/8" - 10 7/8"	19-12-2013	50.0
RPG-21	Pozo Monitoreo	494,532	6,961,972	4,274.65		27-03-2010	108.0
RPG-21c	Pozo Monitoreo	494,895	6,962,445	4,279.29		14-02-2010	96.0
RPG-22	Pozo Monitoreo	496,007	6,964,571	4,256.65		14-02-2010	96.0
RPG-31	Pozo Monitoreo	496,743	6,966,540	4,237.00		01-03-2010	16.0
RPG-32	Pozo Monitoreo	494,519	6,961,979	4,274.51		29-01-2010	60.0
RPG-38	Pozo Monitoreo	494,598	6,962,292	4,277.05		07-03-2010	80.0

5. BALANCE HÍDRICO EN CUENCAS APORTANTES A HUMEDALES

5.1 Aspectos Generales

Con el objetivo de determinar la recarga en las cuencas de los humedales Pantanillo, Valle Ancho y Barros Negros y los aportes de ellas a las cuencas localizadas inmediatamente aguas abajo, se realizaron balances hídricos utilizando la metodología aplicada por la DGA en el informe SDT N° 226 “Análisis de la Situación Hidrológica e Hidrogeológica de la Cuenca Del Salar de Maricunga, III Región” de marzo de 2006.

De acuerdo a dicho informe, y a la zonificación propuesta en él, el Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común Z1 contiene las cuencas aportantes a cada uno de los humedales de interés, tal como se indica en la Figura 5.1. De esta forma, el cálculo de los balances hídricos en cada una de las cuencas aportantes a los humedales de interés corresponde a un desglose del balance determinado para el sector Z1 en el informe DGA (2006).

El balance hídrico del sector Z1 se determinó calculando la recarga (escorrentía total generada en Z1) y descontándole las descargas (evapotranspiración de los humedales), lo que se resume en la Figura 5.2 en un esquema extraído desde el informe DGA (2006).

5.2 Recarga por Cuencas Aportantes

Para los efectos de este análisis, lo primero fue calcular la recarga de cada una de las cuencas aportantes a los humedales, para lo que se realizaron las siguientes tareas:

- Definición de cuencas aportantes
- Determinación de bandas de altura y área por banda
- Cálculo de precipitación, temperatura, evapotranspiración y escorrentía total

La definición de las cuencas aportantes se realizó manualmente digitalizando la cuenca en Google Earth, utilizando además las curvas de nivel como referencia. Esta definición corresponde a un trabajo de más detalle que el realizado en el SDT N° 226, por lo que existe una diferencia en los límites y áreas de las cuencas definidas con la definición del sector Z1, lo que se presenta en la Figura 5.3. Con esta nueva definición el área total del sector Z1 es 431,11 Km², a diferencia de lo determinado en el SDT N° 226 que corresponde a 485,9 Km².

Posteriormente se utilizó el modelo digital de elevaciones “ASTER Global Digital Elevation Model”, el cual fue reclasificado por banda de altura, manteniendo los mismos rangos de altura de la Figura 5.2, luego

de lo cual se calculó el área de cada banda para cada cuenca lo que se presenta resumido en la Figura 5.4.

Para la precipitación y la temperatura se mantuvo la asignada para cada una de las bandas de altura en el informe DGA (2006). Para aquellas nuevas bandas de altura, las que se generaron por el cambio en la definición de las cuencas, se aplicó el gradiente de correspondiente utilizado en el SDT N° 226 (Pp: ± 10 mm por cada 100 metros; T°: $\pm 1,4$ °C por cada 100 metros).

La evapotranspiración se calculó utilizando la fórmula de Turc y la escorrentía total corresponde a la precipitación efectiva, es decir, la precipitación menos la evapotranspiración.

De esta forma, la recarga o escorrentía total generada en cada subcuenca se resume en las Tablas 5.1, 5.2 y 5.3.

Tabla 5.1
Recarga en Cuenca Aportante Humedal Pantanillo

Banda Altura (msnm)	Área (km ²)	Altura Promedio (msnm)	Temp °C	Pp (mm)	Evapotranspiración	Escorrentía Total		
						mm	l/s	
4000-4200	0,26	4.100	1,3	110	109,5	0,51	0	
4200-4400	18,93	4.300	-0,1	130	124,5	5,54	3	
4400-4600	26,54	4.500	-1,5	150	135,4	14,58	12	
4600-4800	23,82	4.700	-2,9	170	140,5	29,52	22	
4800-5000	21,22	4.900	-4,3	190	137,3	52,73	35	
5000-5200	5,28	5.100	-5,7	210	123,2	86,83	15	
5200-5400	0,76	5.300	-7,1	230	96,0	133,95	3	
5400-5600	0,20	5.500	-8,5	250	55,5	194,48	1	
							92	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.2
Recarga en Cuenca Aportante Humedal Valle Ancho

Banda Altura (msnm)	Area (km ²)	Altura Promedio (msnm)	Temp °C	Pp (mm)	Evapotranspiración	Escorrentía Total		
						mm	l/s	
4000-4200	12,60	4.100	1,3	110	109,49	0,51	0	
4200-4400	35,78	4.300	-0,1	130	124,46	5,54	6	
4400-4600	45,03	4.500	-1,5	150	135,42	14,58	21	
4600-4800	22,02	4.700	-2,9	170	140,48	29,52	21	
4800-5000	7,54	4.900	-4,3	190	137,27	52,73	13	
5000-5200	5,52	5.100	-5,7	210	123,17	86,83	15	
5200-5400	4,87	5.300	-7,1	230	96,05	133,95	21	
5400-5600	1,49	5.500	-8,5	250	55,52	194,48	9	
5600-5800	0,70	5.700	-9,9	270	3,98	266,02	6	
5800-6000	0,23	5.900	-11,3	290	0,00	290,00	2	
							114	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.3
Recarga en Cuenca Aportante Humedal Barros Negro

Banda Altura (msnm)	Area (km ²)	Altura Promedio (msnm)	Temp °C	Pp (mm)	Evapotranspiración	Escorrentía Total		
						mm	l/s	
4000-4200	31,83	4.100	1,3	110	109,49	0,51	1	
4200-4400	47,19	4.300	-0,1	130	124,46	5,54	8	
4400-4600	33,41	4.500	-1,5	150	135,42	14,58	15	
4600-4800	39,60	4.700	-2,9	170	140,48	29,52	37	
4800-5000	30,54	4.900	-4,3	190	137,27	52,73	51	
5000-5200	14,68	5.100	-5,7	210	123,17	86,83	40	
5200-5400	2,02	5.300	-7,1	230	96,05	133,95	9	
5400-5600	0,58	5.500	-8,5	250	55,52	194,48	4	
5600-5800	0,38	5.700	-9,9	270	3,98	266,02	3	
5800-6000	0,11	5.900	-11,3	290	0,00	290,00	1	
							169	

Fuente: Elaboración propia

5.3 Descargas por Consumo en Humedales

Para efectos de determinar el consumo, en cada una de las subcuencas, por evapotranspiración de los humedales se utilizó la superficie determinada en el informe técnico “Estudio Multitemporal de la Vegetación Azonal Hídrica, Sectores Pantanillo, Valle Ancho, Barros Negros y Ciénaga Redonda”, desarrollado por Biota Ltda., en mayo de 2015.

El consumo para cada sistema humedal se determinó utilizando una tasa de evapotranspiración media anual de 0.5 l/s/Ha, al igual que en el SDT N°226 (DGA, 2006). En las Tablas 5.4 y 5.5 se resume el consumo total anual en cada uno de los humedales del área de interés. Cabe mencionar que esa es un cifra bastante conservadora en términos de consumo de agua.

Tabla 5.4
Superficie de los Humedales Pantanillo, Valle Ancho, Barros Negros y Ciénaga Redonda

Humedal	Sector	Unidades de Vegetación	Superficie (ha)	Superficie Total Humedal (ha)
Pantanillo	Pantanillo Norte	5	12,2	21,8
	Pantanillo Sur	2	9,6	
Valle Ancho	Valle Ancho Norte	7	25,4	241,9
	Valle Ancho Centro	9	178,2	
	Valle Ancho Sur	5	38,3	
Barros Negros	Barros Negros Norte	6	28,5	146,3
	Barros Negros Sur	6	117,8	

Fuente: Elaboración propia a partir de informe técnico Biota, 2015

Tabla 5.5
Evapotranspiración Total Humedales Pantanillo, Valle Ancho y Barros Negros

Humedal	Sector	Área (ha)	Evapotranspiración (l/s)	Evapotranspiración Total (l/s)
Pantanillo	Pantanillo Norte	12,2	6,1	10,9
	Pantanillo Sur	9,6	4,8	
Valle Ancho	Valle Ancho Norte	25,4	12,7	120,95
	Valle Ancho Centro	178,2	89,1	
	Valle Ancho Sur	38,3	19,15	
Barros Negros	Barros Negros Norte	28,5	14,25	73,15
	Barros Negros Sur	117,8	58,9	

Fuente: Elaboración propia

5.4 Balance Hídrico en Condición Natural

Finalmente, el balance hídrico en una condición de equilibrio por cada subcuenca aportante se presenta en la Tabla 5.6. En la Figura 5.5 se presenta un resumen del balance hídrico en la zona Z1 del sistema Ciénaga Redonda, en el cual sólo se indica un aporte adicional hacia el sector del Humedal Pantanillo proveniente de la recarga desde el río Astaburuaga, el que se produce incluso en la condición natural sin bombeo.

Tabla 5.6
Balance Hídrico Humedales Pantanillo, Valle Ancho y Barros Negros

Humedal	Entradas		Salidas	
	Aporte Aguas Arriba	Recarga	Evapotranspiración	Escorrentía total salida
Pantanillo	Recarga Río Astaburuaga	92,4	10,9	81,5
Valle Ancho	81,5	113,6	121,0	74,1
Barros Negros	74,1	169,2	73,2	170,2

Fuente: Elaboración propia

Como resultado de este análisis se pueden observar los flujos pasantes (Escorrentía Total Salida) a lo largo de la zona Z1. Tal como se observa en la Figura 5.5, los caudales promedios estimados para la recarga en el sistema Z1 permiten satisfacer adecuadamente los requerimientos estimados, de manera conservadora, para los sistemas humedales localizados a lo largo de la quebrada. En particular, para el sistema del Humedal de Valle Ancho el caudal total de aporte, el que incluye la recarga local y el flujo neto desde el sector de Pantanillo, asciende a 195 l/s. En este monto no se ha estimado el aporte natural desde el río Astaburuaga. En este análisis no se consideran variaciones de almacenamiento, provenientes de cambios en los niveles de agua subterránea, ni tampoco las variaciones en las recargas locales como producto de la variabilidad de la precipitación anual en el área.

Como información complementaria, en la Figura 5.6 se incluye la variación de la precipitación anual en la estación Pastos Largos, localizada en la Quebrada Paipote a una altura de 2,260 msnm. Utilizando la variación anual de la precipitación en la estación Pastos Largos se ha estimado la variación del aporte local en la subcuenca del Humedal Valle Ancho, lo que se presenta de manera gráfica en la Figura 5.7. En esta figura se puede observar que existen lapsos de tiempo, por ejemplo entre los años 2003 y 2009, en los cuales los aportes desde la recarga local habrían sido muy reducidos debido a estos años de menor precipitación.

6. ANALISIS DE EFECTOS DEL BOMBEO EN SISTEMA ACUÍFERO CIÉNAGA REDONDA

6.1 Pozos de Monitoreo de Interés

Para analizar el comportamiento del acuífero aguas abajo del campo de pozos se tomaron como referencia pozos de monitoreo ubicados en el eje central de la Quebrada de Ciénaga Redonda. En orden hacia aguas abajo, los pozos considerados son: RPG-22, RA-3, RPG-31, LNF-MW-08, LNF-MW—11, LNF-MW-06, LNF-MW-22 y LNF-MW-17, todos los cuales se presentan en la Figura 6.1.

Para analizar la variación temporal en los niveles de agua subterránea en estos pozos de interés, en conjunto con los pozos de producción, se ha preparado la Figura 6.2. En esta figura se puede observar que todos ellos siguen las mismas tendencias de comportamiento, principalmente aquellos pozos ubicados más cerca del campo de pozos (RPG-22, RA-3 y RPG-31).

Dada la distancia a la que se encuentran se estima que los pozos de monitoreo localizados más allá del pozo RPG-31 no han sido influenciados directamente por el bombeo del campo de pozos (ver situación base del siguiente acápite). Es también importante mencionar que las series de datos disponibles son muy cortas, a diferencia de lo que ocurre con los pozos de monitoreo localizados en el sector de Pantanillo que cuenta con una extensión que permite analizar tendencias.

Es importante destacar que el pozo LNF-MW-22 se ubica en las cercanías del Humedal Valle Ancho, mientras que el pozo LNF-MW-17 se ubica en el sector de Barros Negros.

6.2 Tiempos de Viaje en sentido Sur – Norte (Humedal Valle Ancho)

6.2.1 Aspectos Generales

Para estimar el tiempo de viaje del descenso observado de niveles en la Quebrada de Ciénaga Redonda se analizaron los gráficos de niveles históricos de los pozos de producción RA-1 y RA-2, así como del pozo RA-3, pozo de observación y punto representativo del humedal Pantanillo previo a la ampliación de la red de monitoreo en 2010.

A partir de la información del tiempo de viaje, y considerando la distancia entre los pozos de bombeo y el de observación, se puede estimar preliminarmente la tasa de avance del cono de descenso o depresión, en metros por año, con lo que se puede proyectar el tiempo aproximado en el cual el efecto del bombeo llegaría a cada uno de los sistemas de humedales. Cabe mencionar que un análisis más detallado, incluyendo el desarrollo de un modelo numérico hidrogeológico del sector de interés se

encuentra actualmente en preparación. Este análisis permitirá confirmar las estimaciones presentadas en este documento.

Es importante destacar que en esta proyección sólo se considera el efecto del consumo de agua subterránea por almacenamiento, sin tomar en consideración la recarga por aportes laterales que podrían tener los sistemas de humedales localizados en el eje de la quebrada, así como tampoco el efecto que frenaría el avance del “frente de descensos” por la recarga que se produciría a lo largo del sistema acuífero.

6.2.2 Situación Base

Considerando la data histórica de los niveles de agua subterránea en el campo de pozos, presentado en la Figura 6.3, se observa un comportamiento medianamente estable en el periodo de suspensión temporal de la mina y chancado de CMM (2001 a 2005).

Junto con el reinicio del bombeo, a mediados del año 2005, se observa el inicio del descenso de niveles de agua subterránea en los pozos RA-1 y RA-2, lo que se caracteriza por el evidente cambio de pendiente en la tendencia observada. Este cambio de tendencia se hace notar en los niveles de RA-3 en aproximadamente junio de 2010, cuando se produce un quiebre cuya pendiente es similar, en inclinación, a la pendiente de descensos en RA-1 y RA-2. Así, se considera que aproximadamente en dicha fecha llega el efecto del bombeo a RA-3, es decir, el efecto del bombeo tardó cerca de 5 años en presentarse en el pozo de observación RA-3. Al observar el comportamiento de los niveles en el pozo de monitoreo RPG-31 (ver Figura 6.2) se puede identificar la llegada del efecto de bombeo hacia finales del año 2011, es decir un poco más de 6 años luego de reiniciar el bombeo el año 2005.

Espacialmente, para incorporar el efecto combinado del bombeo desde los pozos RA-1 y RA-2, se ha considerado la existencia de un pozo equivalente (PEq), localizado aproximadamente en la mitad de la distancia entre ambos pozos. Este pozo equivalente estaría ubicado muy cercano al pozo de monitoreo RPG-22, tal como se observa en la Figura 6.4. Dada la ubicación del pozo equivalente, su distancia al pozo RA-3 y los 5 años que tardó en evidenciarse el efecto del bombeo en RA-3, se puede estimar una tasa de avance del “frente de descenso de niveles” de 333,6 metros por año, en el eje de la quebrada.

Con la tasa de avance antes determinada se proyectó la ubicación anual del “frente de descenso de niveles” a lo largo del eje de la quebrada, lo que se presenta en la Figura 6.5, con lo que se tiene lo siguiente:

- El “frente de descenso de niveles” en 2015 se encontraría muy cercano al límite norte del sector sur del humedal Pantanillo.

- En 2020 llegaría a la vega lateral, que el informe de fiscalización reconoce como parte de Pantanillo (sector norte).
- En 2035 llegaría al humedal Valle Ancho, en 2057 al humedal Barros Negros y en 2105 al humedal Ciénaga Redonda.

6.2.3 *Análisis de Sensibilidad*

Si se observan los niveles de RA-3 en la Figura 6.6, se evidencia una variación y leve descenso del nivel entre 2009 y 2010. Esto podría interpretarse como una “llegada temprana” del efecto del bombeo de los pozos RA-2 y RA-1, con lo que el “frente de descenso de niveles” habría tardado 4 años en llegar a RA-3, es decir una mayor velocidad de avance.

A partir de lo antes indicado, y para estar del lado de la seguridad, se realizó un análisis de sensibilidad disminuyendo en un año el tiempo de llegada del frente de avance. Entonces, como la distancia entre el pozo equivalente y RA-3 es 1.668 metros y el efecto habría tardado 4 años en llegar, la nueva tasa de avance del “frente de descenso de niveles” es de 417,0 metros por año, en el eje de la quebrada.

Con esta tasa de avance, se tiene la siguiente información que se resume desde la Figura 6.7:

- El “frente de descenso de niveles” en 2015 se encontraría muy cercano a la vega lateral que el informe de fiscalización reconoce como parte del humedal Pantanillo (sector norte) y en 2017 superaría a la vega lateral.
- En 2028 llegaría a la vega Valle Ancho, en 2047 a la vega Barros Negros y en 2084 a la vega Ciénaga Redonda.

En un escenario aún más conservador, se podría considerar que el tiempo de llegada del “frente de descenso de niveles” se reduce a la mitad, es decir, el efecto del bombeo tarda solo 2,5 años en llegar a RA-3. Bajo este escenario la tasa de avance sería 667,2 metros por año.

Con esta tasa de avance, se tiene la siguiente información que se resume desde la Figura 6.8:

- El “frente de descenso de niveles” en 2012 hubiese llegado a la vega lateral que el informe de fiscalización reconoce como parte del Humedal Pantanillo (sector norte).
- Actualmente (2015), el frente estaría a mitad de camino al humedal Valle Ancho y en 2020 llegaría a Valle Ancho.
- En 2032 llegaría al humedal Barros Negros y en 2055 al humedal Ciénaga Redonda.

En la Figura 6.9 se presenta la comparación de los escenarios para las distintas tasas de avance consideradas. Es importante mencionar que este análisis sólo considera el avance del cono de depresión,

sin considerar la existencia de recargas intermedias que harían detener el avance de dicho frente al equilibrar el consumo de almacenamiento con la recarga local.

6.2.4 Conclusiones Preliminares

De acuerdo a lo recién indicado, el avance del cono de depresión producido por la extracción de aguas subterráneas en el sector de Pantanillo se puede estimar en función de los datos de monitoreo disponible.

De esta forma, al considerar diversas situaciones para los cambios observados en el pozo RA-3, desde los casos promedio hasta los muy conservadores, se estima que el efecto del bombeo se encuentra en un sector intermedio entre el Humedal Pantanillo y el sector del Humedal Valle Ancho. Incluso las tasas de avance más conservadoras (mayores velocidades) indican que el cono de depresión se encontraría en sectores intermedios.

De igual forma, la información más local correspondiente a los cambios observados en el pozo de monitoreo RPG-31 indica que el cono de depresión se estabilizó a inicios del año 2014, lo que confirmaría la reducción de la velocidad de avance en la dirección del Humedal Valle Ancho.

Es también importante recordar la dependencia de las recargas locales de los montos de precipitación, los que tal como se muestra en las Figuras 5.6 y 5.7, estarían bajo su promedio histórico. De esta forma, menores caudales de aporte a los sistemas humedales localizados en sectores más bajos de la cuenca de Ciénaga Redonda se pueden relacionar con este menor aporte de precipitación, y no necesariamente con el efecto del bombeo desde sectores altos de la cuenca.

6.3 Tiempos de Viaje en sentido Norte - Sur (Laguna Negro Francisco)

Este análisis es básicamente una extensión del realizado para el tramo entre Pantanillo y Valle Ancho. En este caso se utilizaron las mismas tasas de avance para estimar el avance de un eventual cono de depresión hacia el sector de Laguna Negro Francisco.

En este caso se presentan las Figuras 6.10, 6.11 y 6.12 que ilustran la situación para las tres tasas de avance de 333,6, 417,0 y 667,2 m/año. Para los tres casos se observa que por las distancias entre el campo de pozos y el área de Laguna Negro Francisco, la eventual llegada de los efectos del bombeo es muy alejada de la fecha actual.

En el caso del sistema Río Astaburuaga y Laguna Negro Francisco, el análisis es altamente conservador, ya que a lo largo del sistema se produce recarga desde el río mismo, lo que haría más lento el avance de cualquier frente o cono de depresión futuro.

Para analizar en mayor detalle esta situación se dispone de pozos de monitoreo en los cuales se ha recolectado información para realizar análisis de mayor detalle que incluyen un modelo de simulación basado en un modelo conceptual cuyo conocimiento se ha ido mejorando con la información levantada en los últimos años.

6.4 Balance Hídrico en Situación con Bombeo

En la Figura 6.13 se presenta un esquema de los flujos de recarga y caudales pasantes en la cual se ha incluido el monto histórico de los caudales de bombeo en el sector de Pantanillo en los últimos 10 años y que alcanza a 66,5 l/s.

Tal como se ha indicado previamente, la extracción de aguas subterráneas se asocia a la recarga del acuífero y al consumo de almacenamiento local, el que se traduce en cambios de los niveles de agua subterránea en pozos de bombeo y de observación cercanos.

De esta forma, y tal como la información disponible lo indica, el bombeo histórico desde el campo de Pozos de Pantanillo ha sido suplido por cuatro fuentes específicas:

- recarga local
- aportes de agua por infiltraciones desde el río Astaburuaga
- consumo de almacenamiento en el sistema acuífero local
- reducción de caudales pasantes hacia sectores localizados aguas abajo

Tal como se observa en los registros históricos de niveles de agua subterránea en los pozos RA-1, RA-2 y RA-3, complementados por aquellos instalados el año 2010 (RPG-31L, RPG-22, RPG-21C, RPG-32, RPG-21M, RPG-21L y RPG-38M), el consumo de almacenamiento queda registrado en la forma en la que se ha producido el descenso de niveles y la expansión gradual del cono de depresión.

De esta forma, si bien es posible que el caudal pasante a la sección siguiente (81,5 l/s) puede haberse reducido en las inmediaciones del sector del Humedal Pantanillo, los análisis sobre la expansión del cono de depresión indican que dicho efecto no es el causante de una eventual reducción de los aportes de agua hacia el sector de Valle Ancho, lo que podría estar relacionado más bien con efectos propios de la menor precipitación histórica sobre estos sectores, en los últimos 10 años, lo que quedan reflejados en la información dispuesta en las Figuras 5.6 y 5.7.

7. CONCLUSIONES

Con base en los diversos análisis descritos en los puntos anteriores es posible extraer las siguientes conclusiones generales:

- El bombeo productivo desde los pozos RA-1 y RA-2, el que se reanudó a mediados del año 2005, ha provocado descensos del nivel de agua subterránea en los pozos de bombeo en el sector de Pantanillo, lo que se observa en la información registrada en los pozos de bombeo RA-1 y RA-2, así como en diversos pozos de observación localizados en el área (RA-3, RPG-22 y RPG-31).
- Estimaciones realizadas con los datos disponibles del nivel de agua subterránea en pozos del sector de Pantanillo (los que contienen la información de mayor extensión histórica), y también utilizados por la SMA en su análisis, indican que los efectos del bombeo se han extendido gradualmente desde el año 2005, evidenciándose dichos efectos hacia el año 2010 en el pozo de monitoreo RA-3, y luego a partir del año 2012 en el pozo de monitoreo RPG-31.
- La información disponible indica que el bombeo histórico desde el campo de Pozos de Pantanillo ha sido suplido por cuatro fuentes específicas: recarga local, aportes de agua por infiltraciones desde el río Astaburuaga, consumo de almacenamiento en el sistema acuífero local, y reducción de caudales pasantes hacia sectores localizados aguas abajo.
- Tal como se observa en los registros históricos de niveles de agua subterránea en los pozos de bombeo y monitoreo RA-1, RA-2 y RA-3, complementados por aquellos instalados el año 2010 (RPG-31L, RPG-22, RPG-21C, RPG-32, RPG-21M, RPG-21L y RPG-38M), el consumo de almacenamiento queda registrado en la forma en la que se ha producido el descenso de niveles y la expansión gradual del cono de depresión.
- En el caso de los pozos de bombeo del sector de Pantanillo (RA-1 y RA-2), la extracción de aguas subterráneas ha producido una reducción paulatina tanto del caudal pasante como del volumen almacenado local (reducción de los niveles de agua subterránea en los pozos RA-1, RA-2 y RA-3).
- Lo anterior indica que si bien los efectos del bombeo se pueden haber seguido extendiendo hacia los sectores localizados aguas abajo del campo de pozos de Pantanillo (RA-1 y RA-2), el tiempo de viaje observado permite concluir que dichos efectos no se habrían extendido hasta el sector Valle Ancho y Barros Negros, por lo cual en dichos sectores la eventual reducción del caudal de aporte subterráneo puede ser causada por efectos locales de recarga más que por el efecto del bombeo en Pantanillo.
- De esta forma, si bien es posible que el caudal pasante a la sección siguiente (81,5 l/s) puede haberse reducido en las inmediaciones del sector del Humedal Pantanillo, los análisis sobre la expansión del cono de depresión indican que dicho efecto no es el causante de una eventual reducción de los aportes de agua hacia el sector de Valle Ancho, lo que podría estar relacionado más bien con efectos propios de la menor precipitación histórica sobre estos sectores, en los últimos 10 años.
- Una situación similar se observa para el caso de Laguna Negro Francisco, en el sentido que los efectos del bombeo en Pantanillo, incluso para la situación más conservadora, no se habrían extendido hacia sectores de relevancia ambiental.

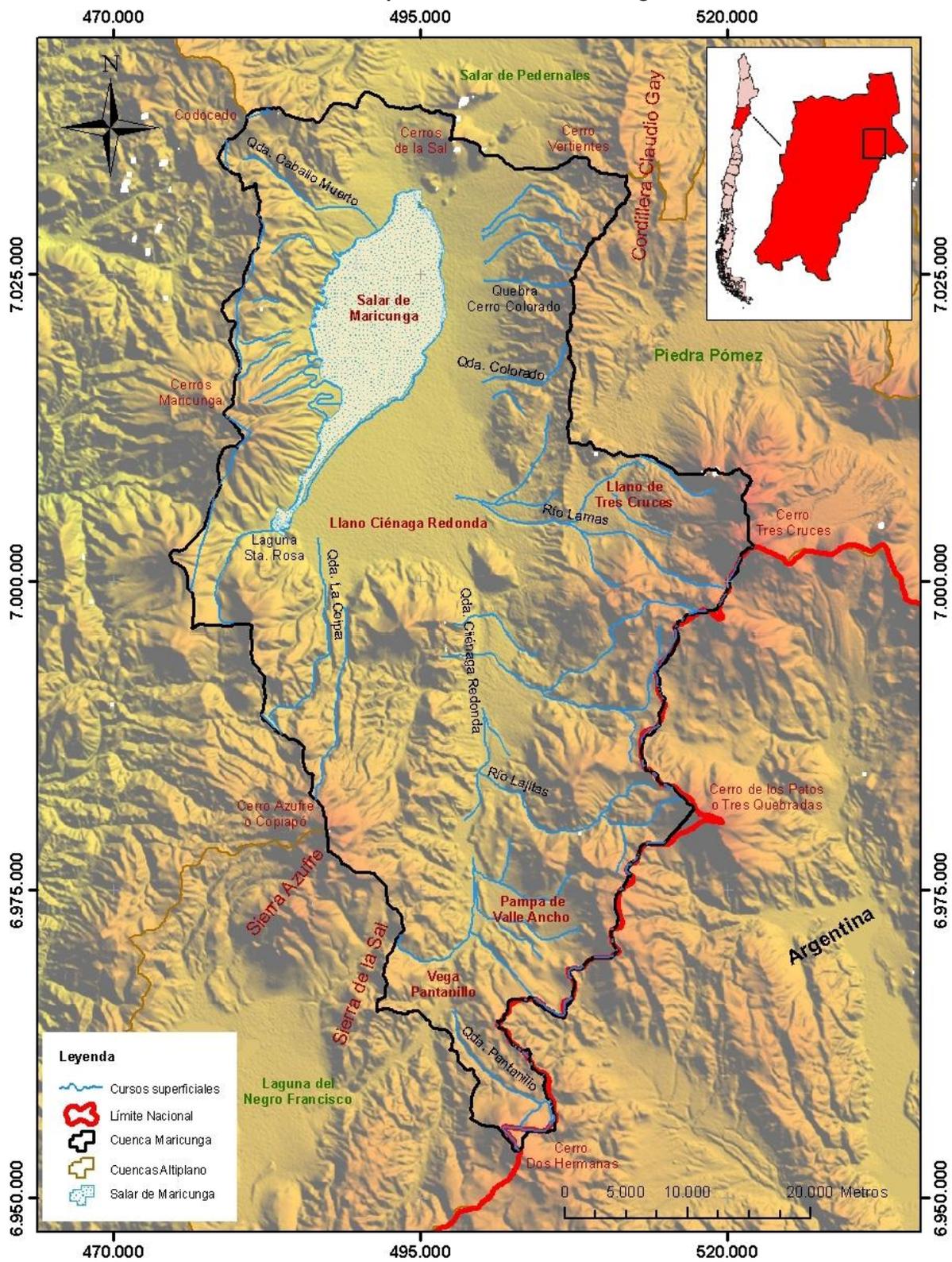
8. INFORMACIÓN DISPONIBLE

Para realizar este pronunciamiento, HIDROMAS contó con diferentes documentos técnicos de referencia:

- DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS. Balance Hídrico de Chile. 1987.
- SITAC. Evaluación Hidrogeológica Salar de Maricunga. 1992.
- ERA. Estudio Hidrogeológico Salar de Maricunga. 1998.
- SERNAGEOMIN. Mapa Hidrogeológico de la Cuenca Salar de Maricunga. 1999.
- DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS. SIT N°51. Geoquímica de Aguas en Cuencas Cerradas: I, II y III Regiones – Chile. 1999.
- DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS. Análisis de la situación hidrológica e hidrogeológica de la cuenca del Salar de Maricunga. 2006.
- DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS. Levantamiento hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua en áreas prioritarias de la zona norte de Chile, regiones XV, I, II y III. 2009.
- GOLDER. Memorando Técnico. Modelación Flujo de Agua Subterránea en Campo de Pozos Pantanillo, Mina Maricunga. 2010.
- GOLDER ASSOCIATES. Reinicio y expansión del Proyecto Lobo Marte. Línea Base Hidrogeológica e Hidrológica Lobo Marte y Modelo Hidrogeológico Ciénaga Redonda. Doc. N° 099 215 5008 - IT009_Rev.1. 2011.
- AMEC. Anexo 8. Informe Consolidado. Informe de Detallamiento de Línea de Base y Monitoreo de Humedales. Reinicio y Expansión del Proyecto Lobo Marte. Región de Atacama. 2012.
- BIOTA GESTIÓN Y CONSULTORÍAS AMBIENTALES LTDA. Evaluación de la Vegetación Azonal Hídrica, Sectores Laguna Santa Rosa y Salar De Maricunga. 2015.
- SuperIntendencia de Medio Ambiente. Informe de Fiscalización Ambiental DFZ-2015-8-111-RCA-IA. 2015.

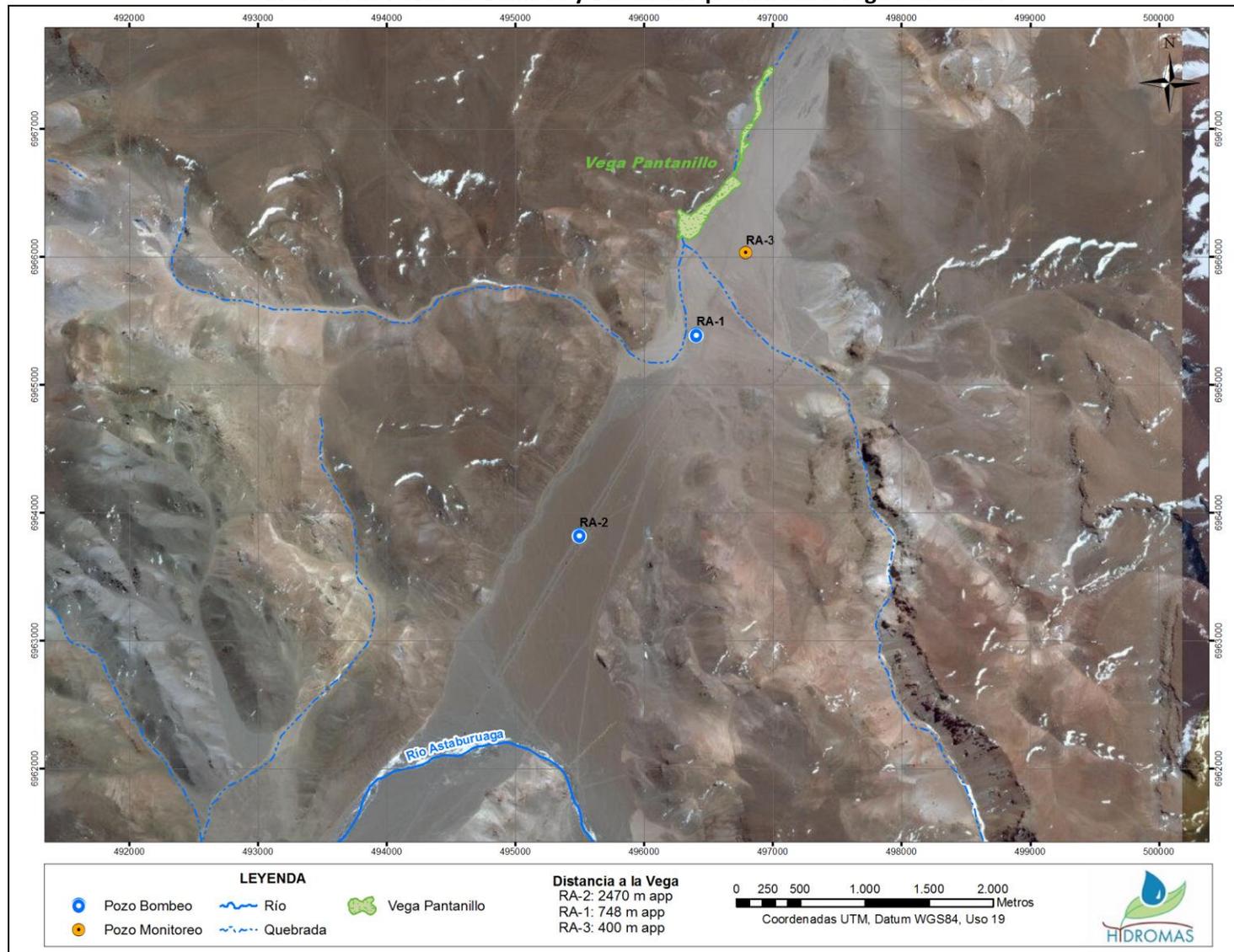
FIGURAS

Figura 1.1
Cuenca Aportante Salar de Maricunga



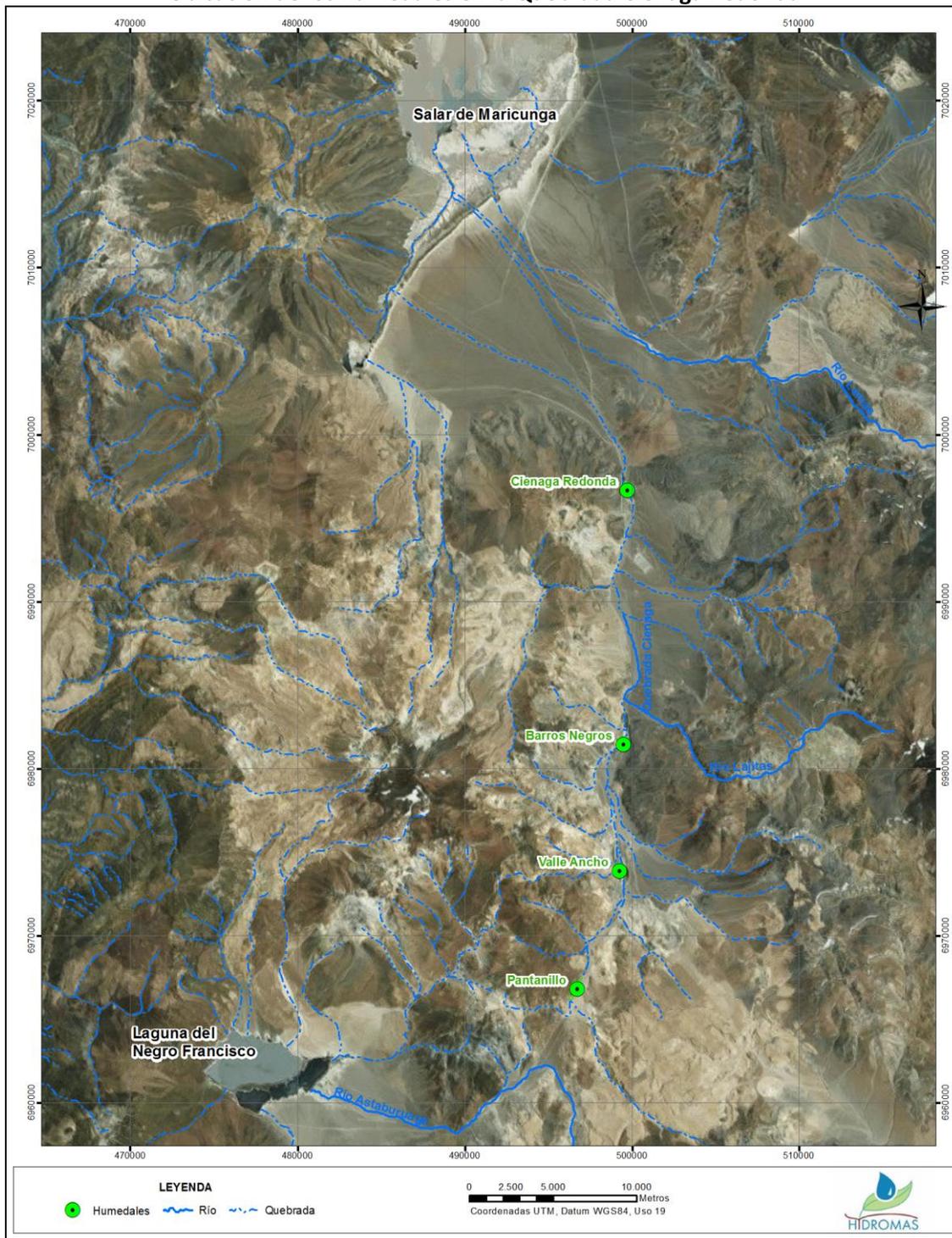
Fuente (DGA-DICTUC, 2009)

Figura 1.2
Ubicación de Pozos de Bombeo y Distancia Aproximada a Vega Pantanillo.



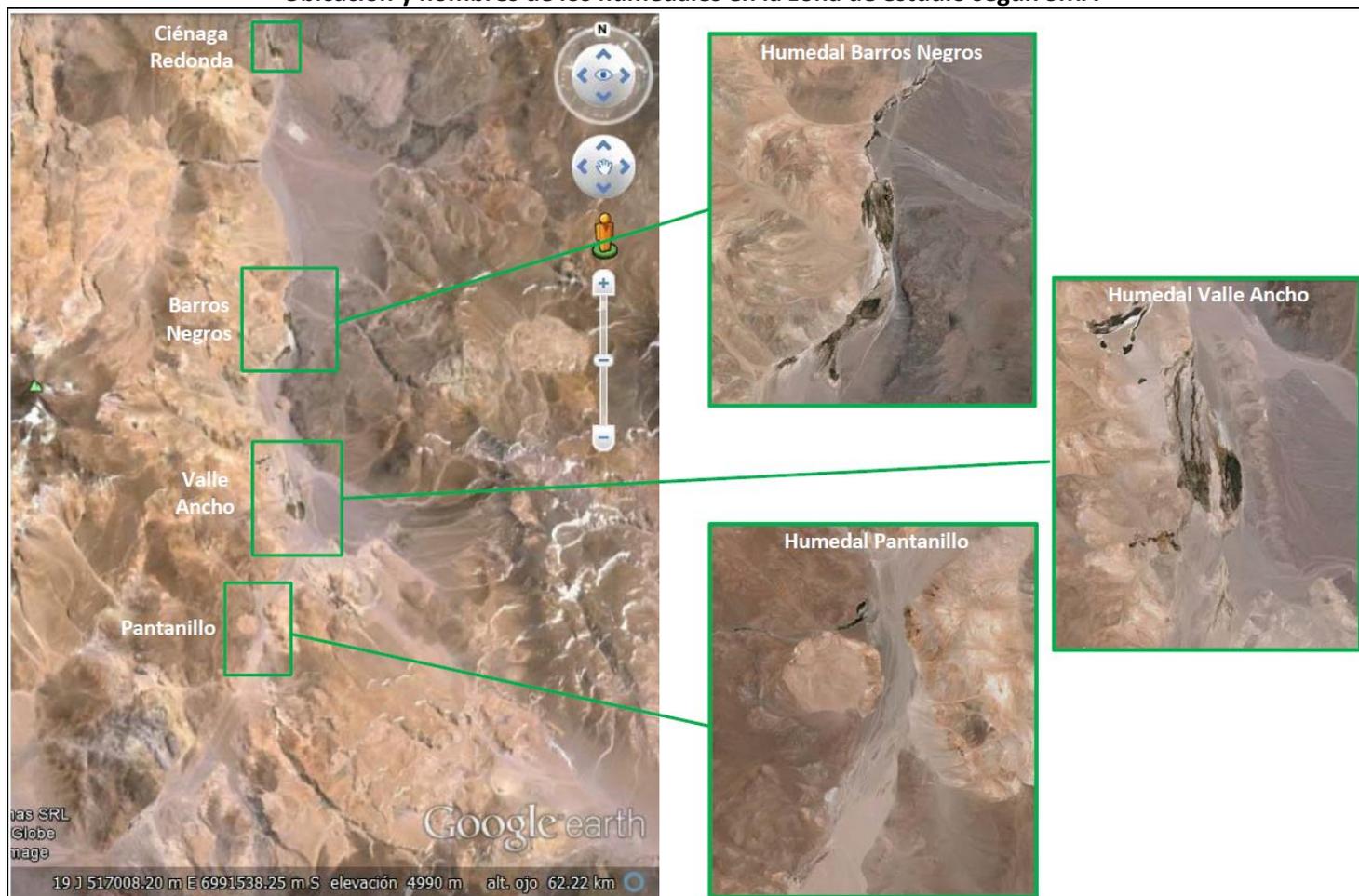
Fuente: Elaboración Propia

Figura 3.1
Ubicación de los humedales en la Quebrada Ciénaga Redonda



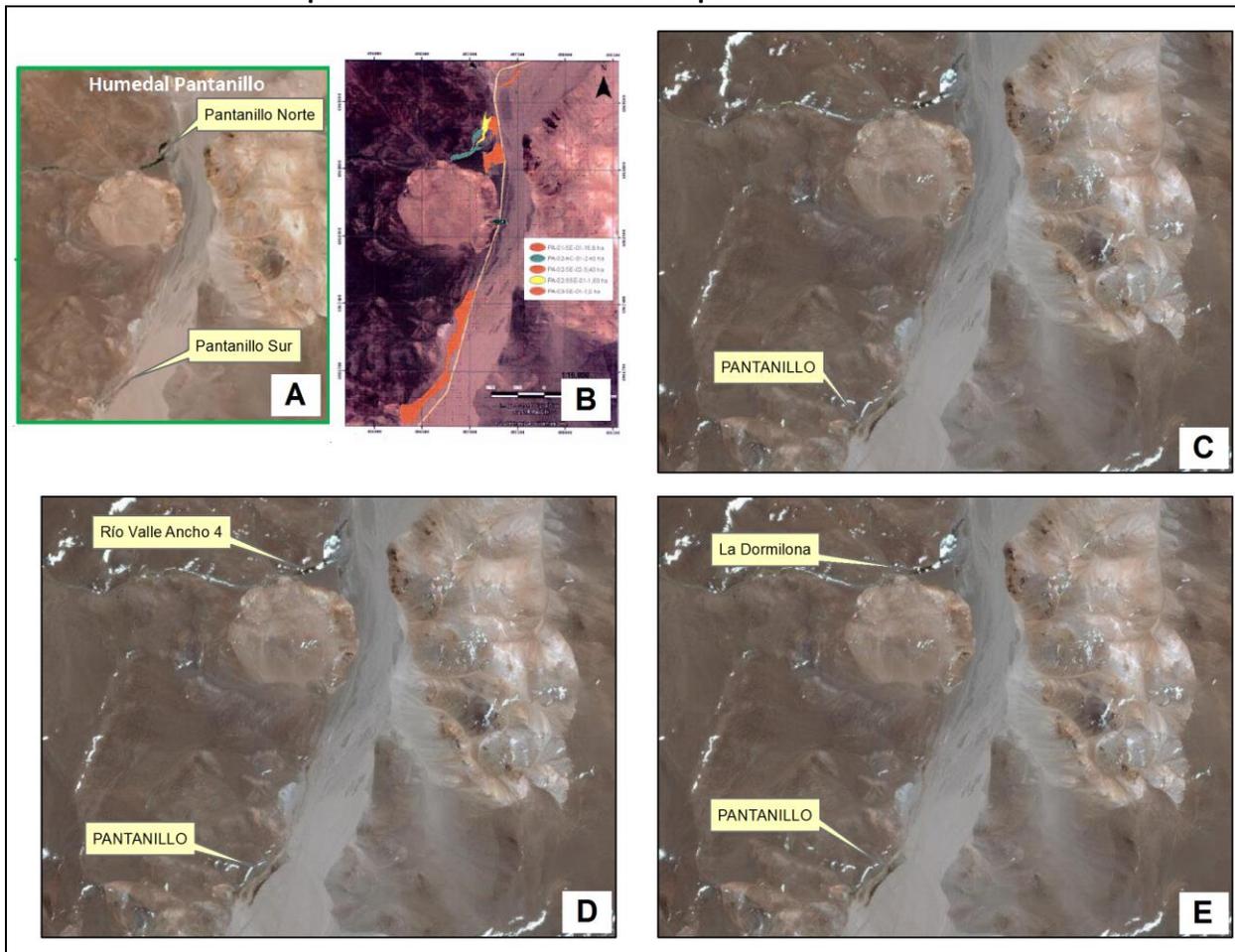
Fuente: Elaboración Propia

Figura 3.2
Ubicación y nombres de los humedales en la zona de estudio según SMA



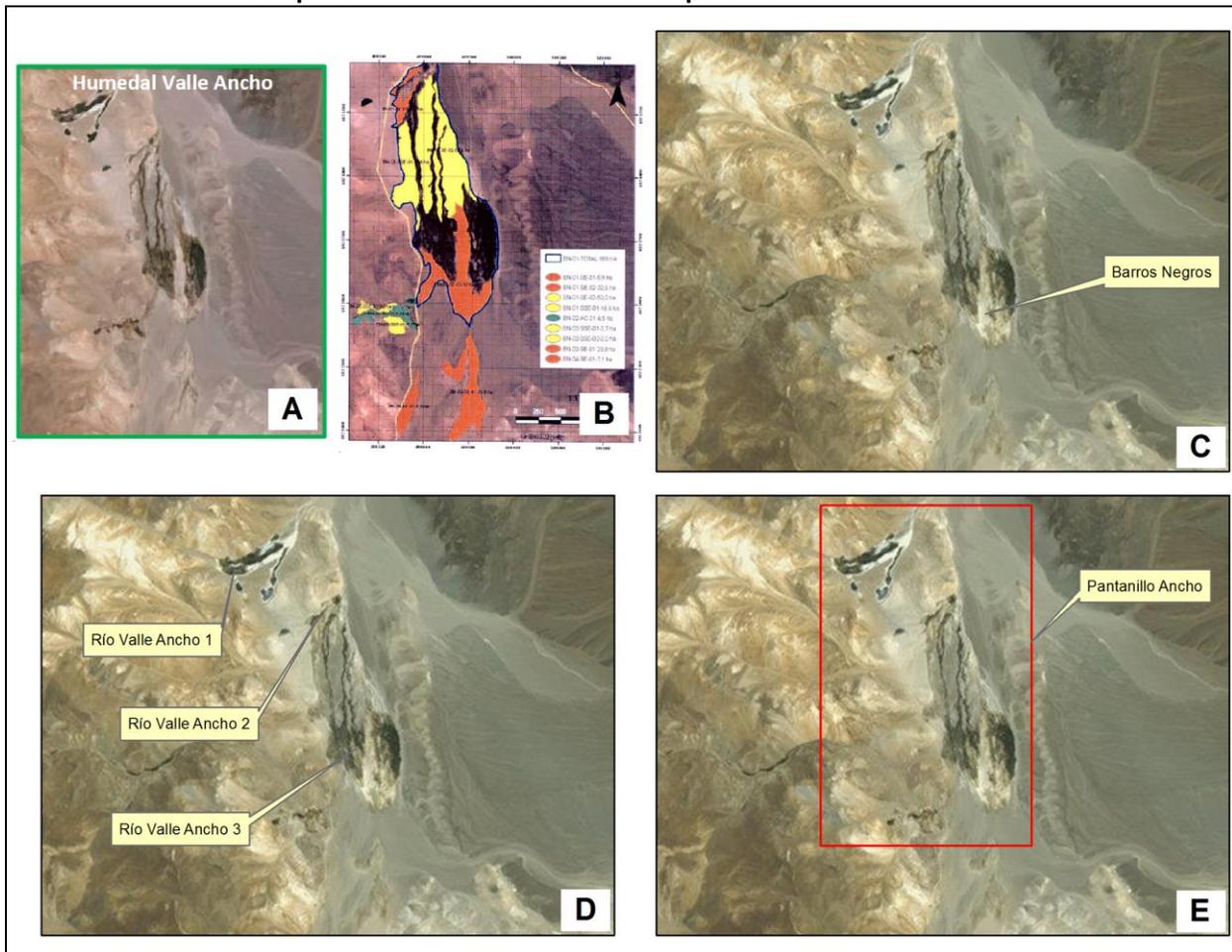
Fuente: Informe de Fiscalización Ambiental DFZ-2015-8-111 -RCA-IA, SMA (2015).

Figura 3.3
Comparación de Nombres Utilizados para Humedal Pantanillo



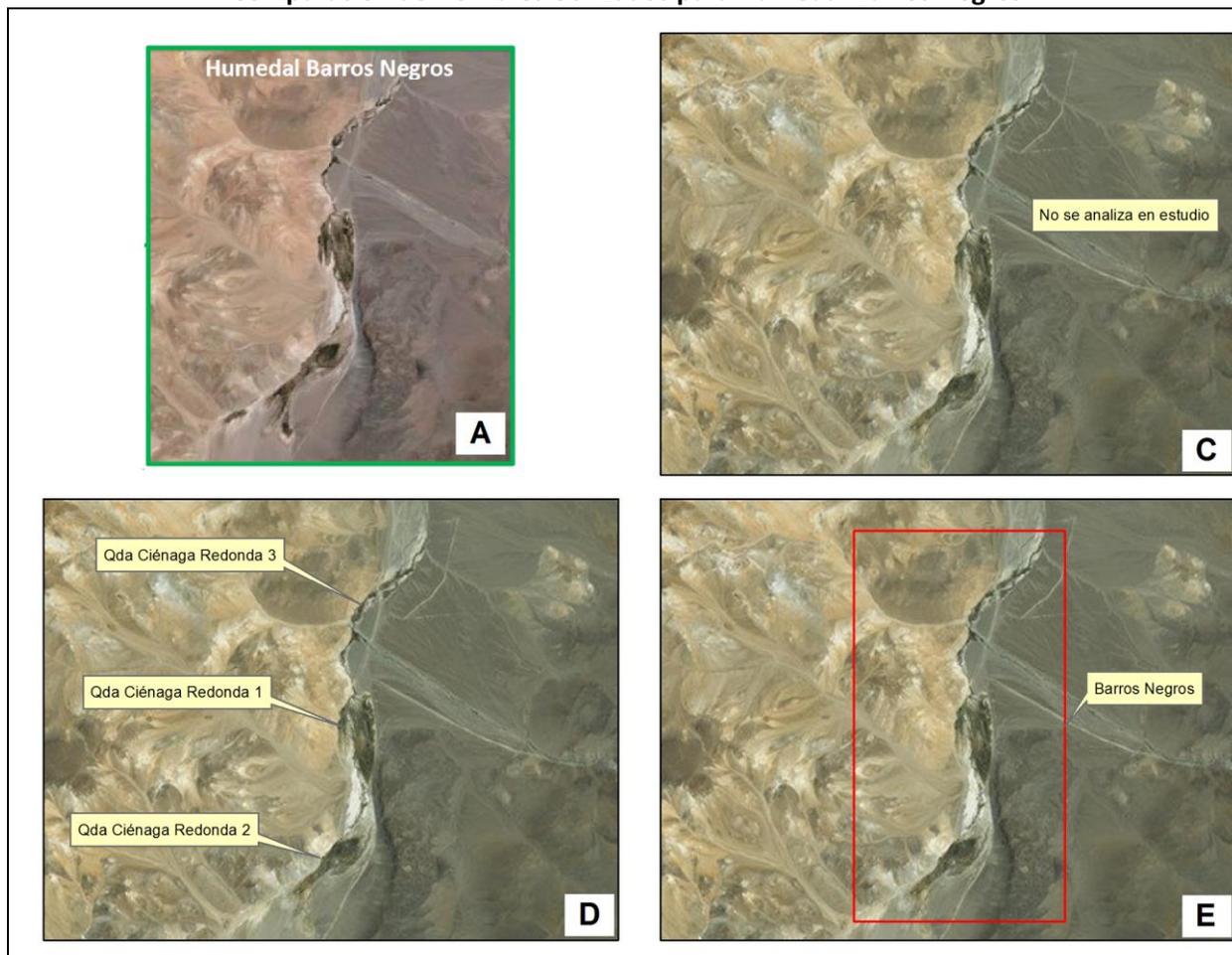
Fuente: Elaboración Propia

Figura 3.4
Comparación de Nombres Utilizados para Humedal Valle Ancho



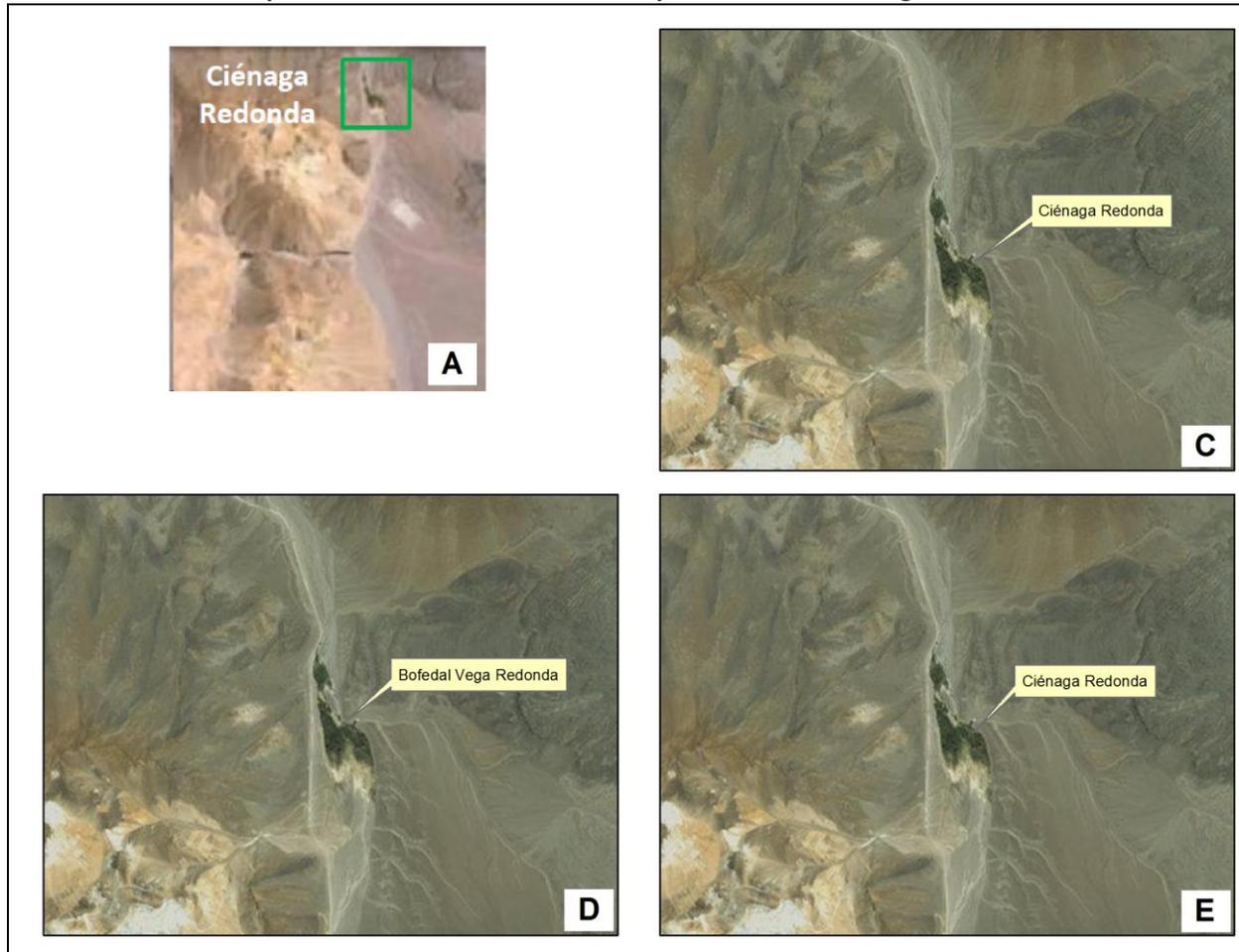
Fuente: Elaboración Propia

Figura 3.5
Comparación de Nombres Utilizados para Humedal Barros Negros



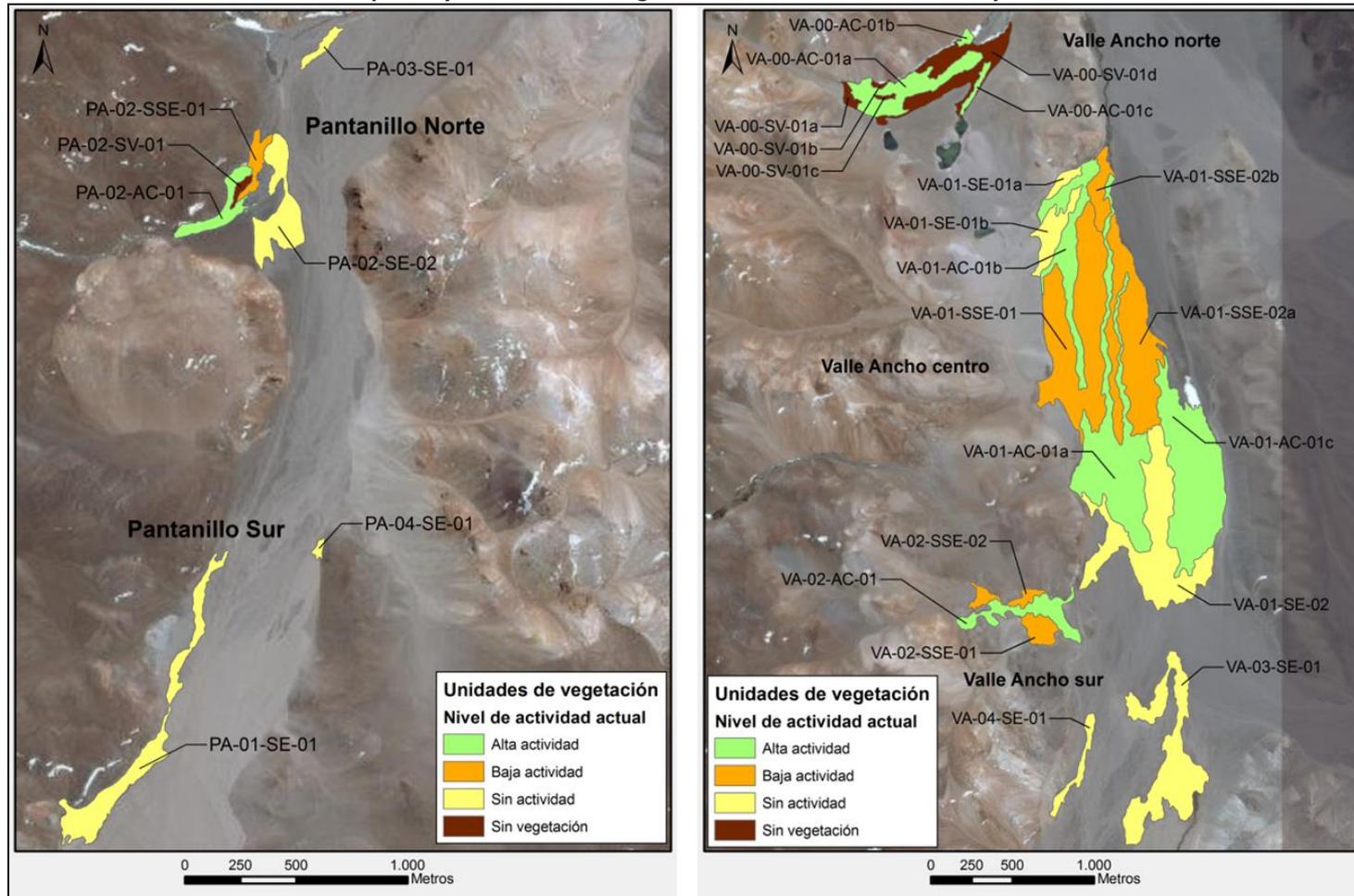
Fuente: Elaboración Propia

Figura 3.6
Comparación de Nombres Utilizados para Humedal Ciénaga Redonda



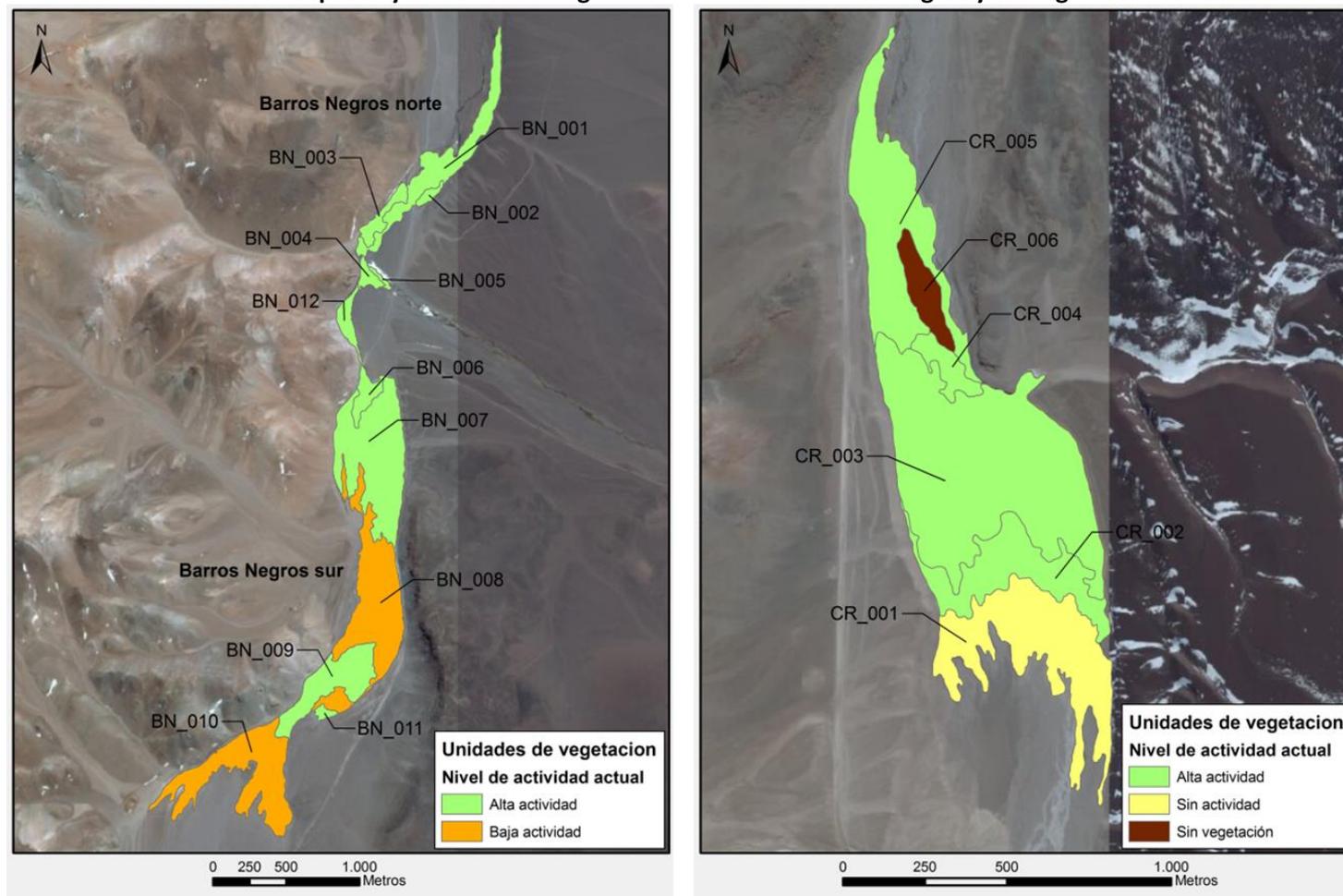
Fuente: Elaboración Propia

Figura 3.7
Extensión Espacial y Unidades de Vegetación Húmedas Pantanillo y Valle Ancho



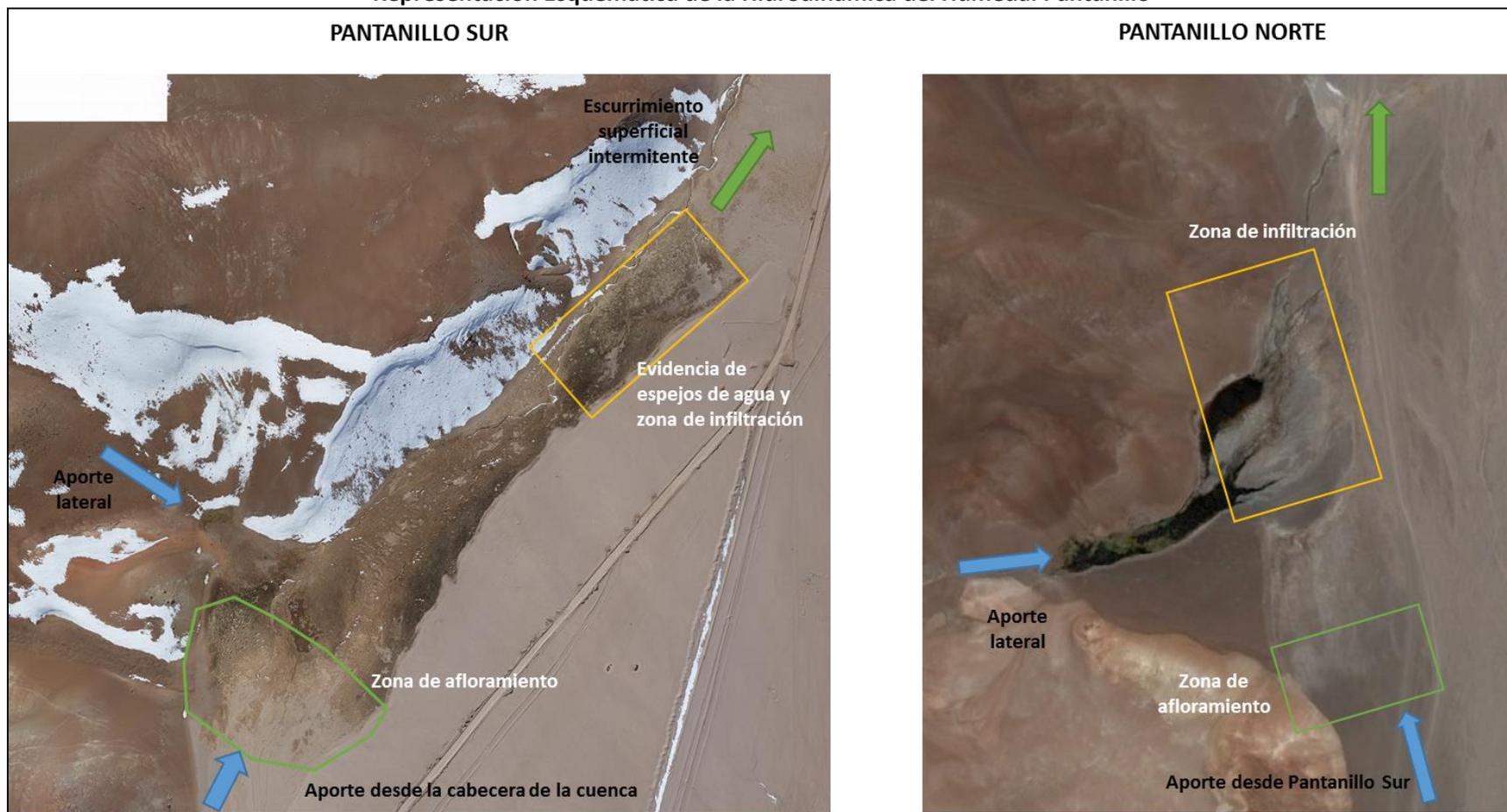
Fuente: Informe Técnico Biota, 2015

Figura 3.8
Extensión espacial y unidades de vegetación Humedales Barros Negros y Ciénaga Redonda



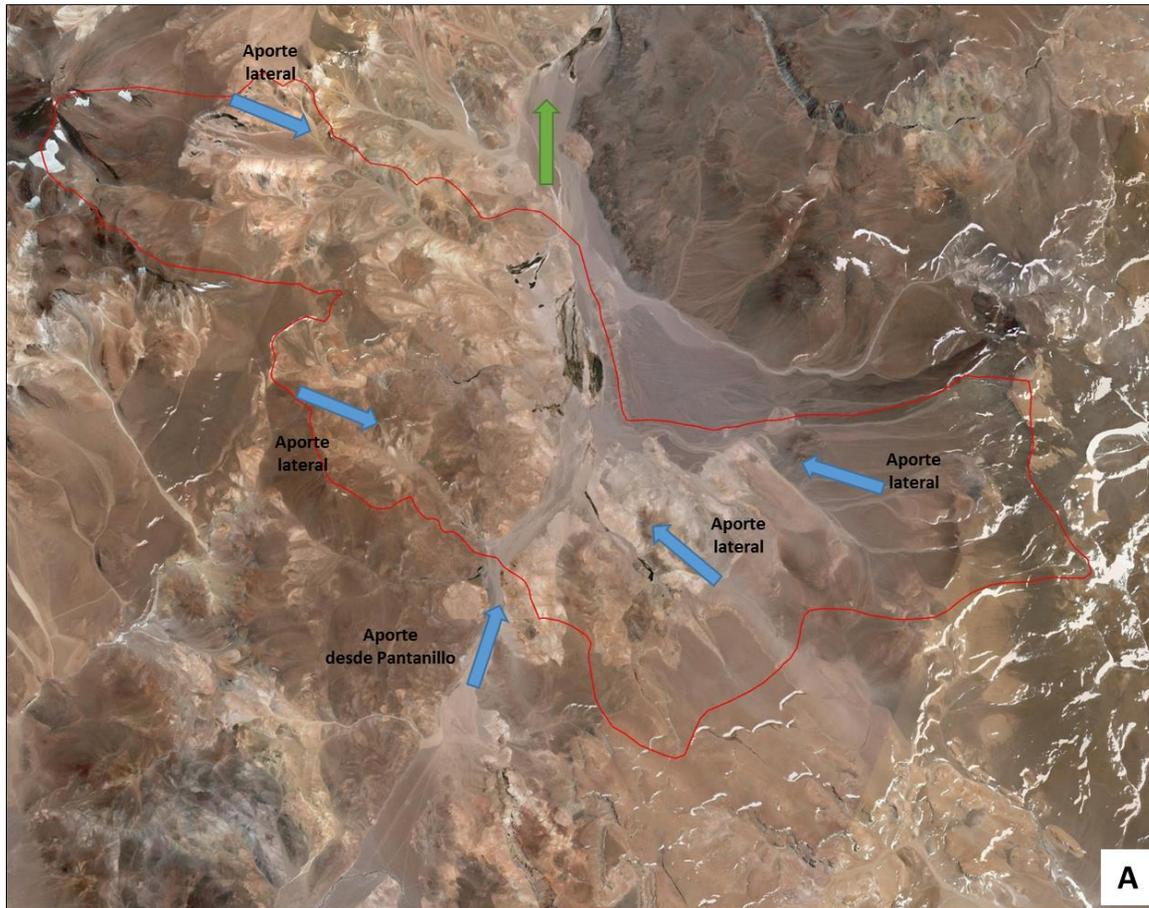
Fuente: Informe Técnico Biota, 2015

Figura 3.9
Representación Esquemática de la Hidrodinámica del Humedal Pantanillo



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.10
Representación Esquemática de la Hidrodinámica del Humedal Valle Ancho
Cuenca aportante Valle Ancho

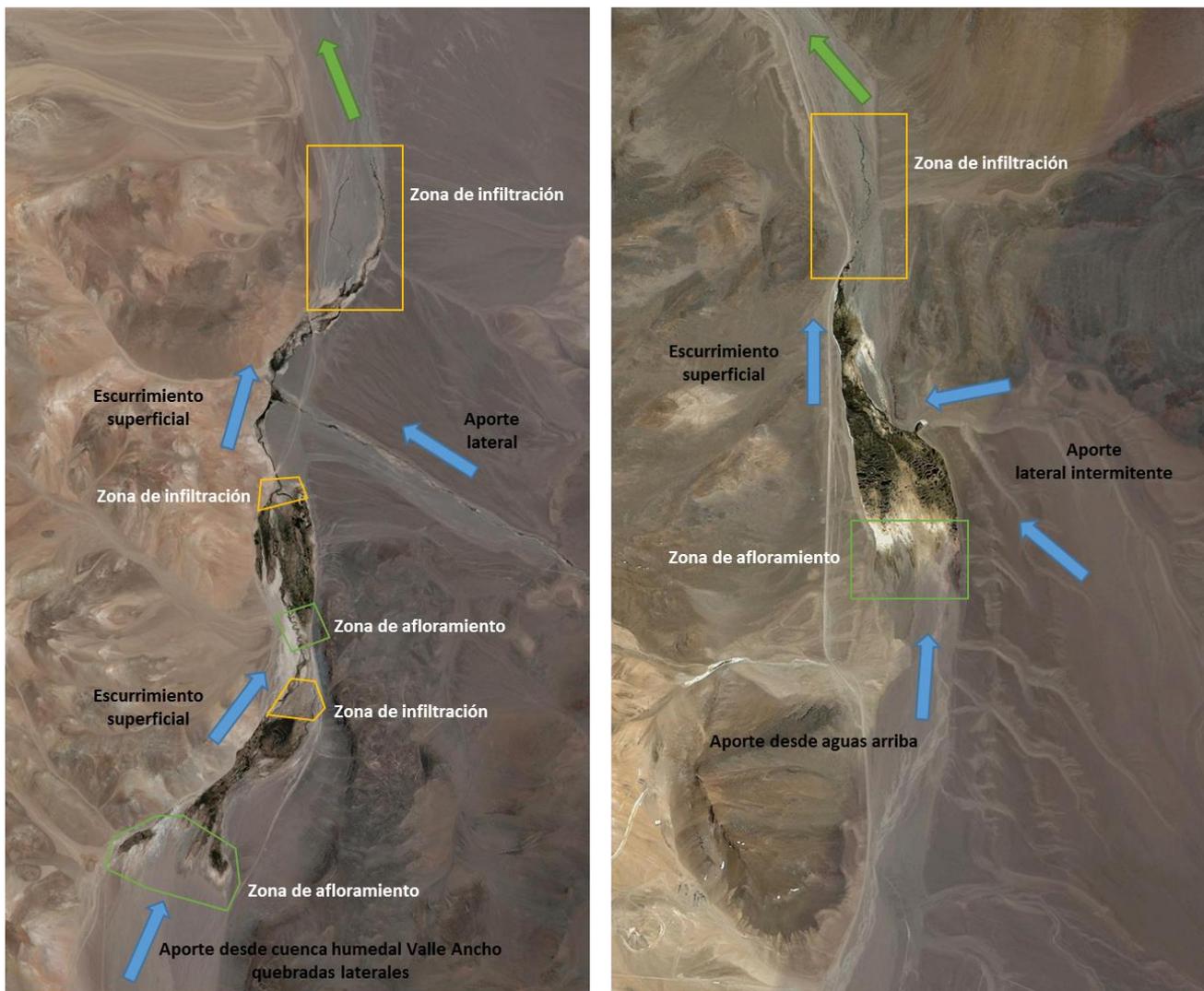


Fuente: Elaboración propia

Humedal Valle Ancho



Figura 3.11
Representación Esquemática de la Hidrodinámica Humedales Barros Negros y Ciénaga Redonda



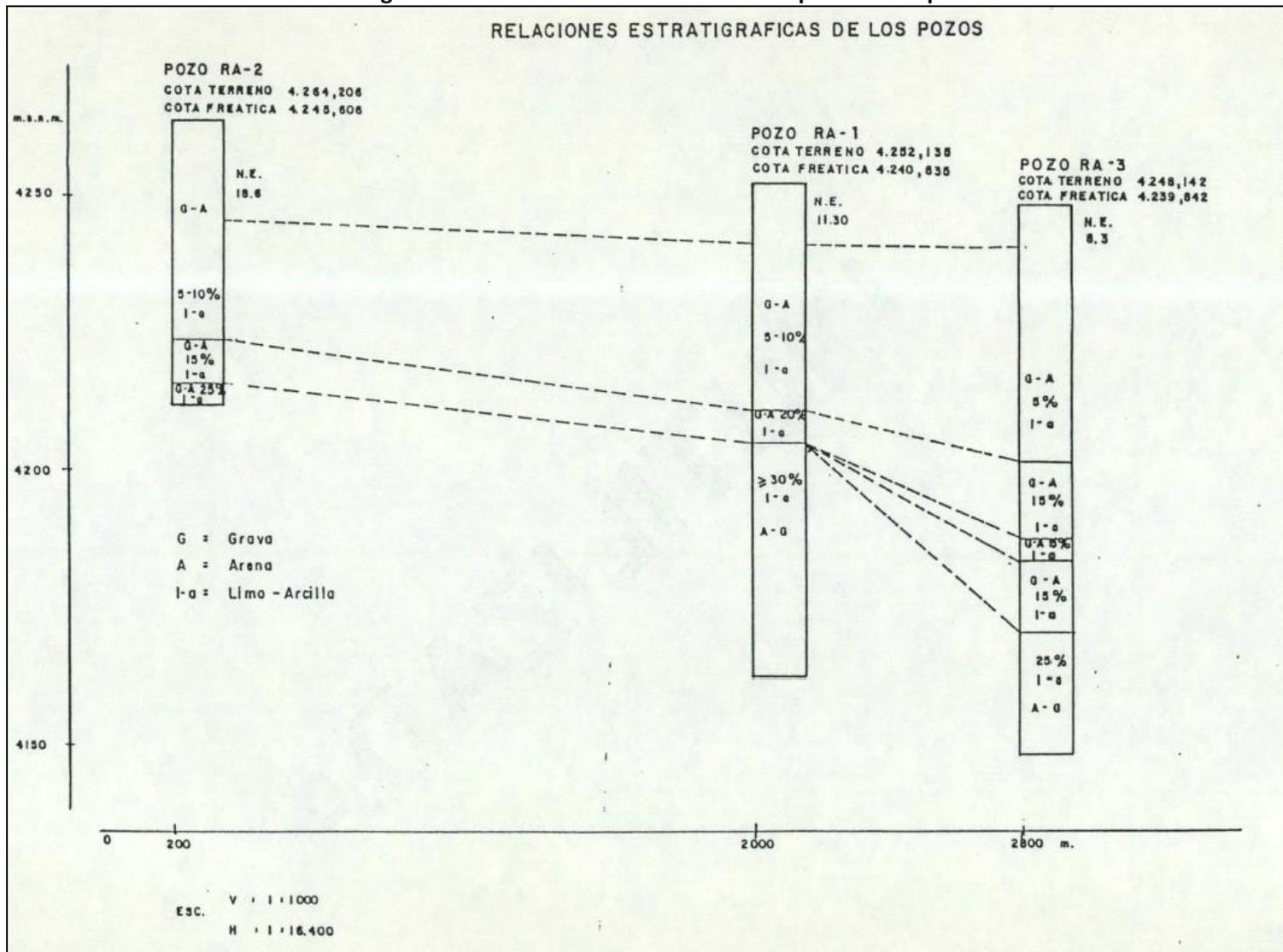
Fuente: Elaboración propia

Figura 4.1
Ubicación de Pozos de Bombeo y Distancia Aproximada a Vega Pantanillo.



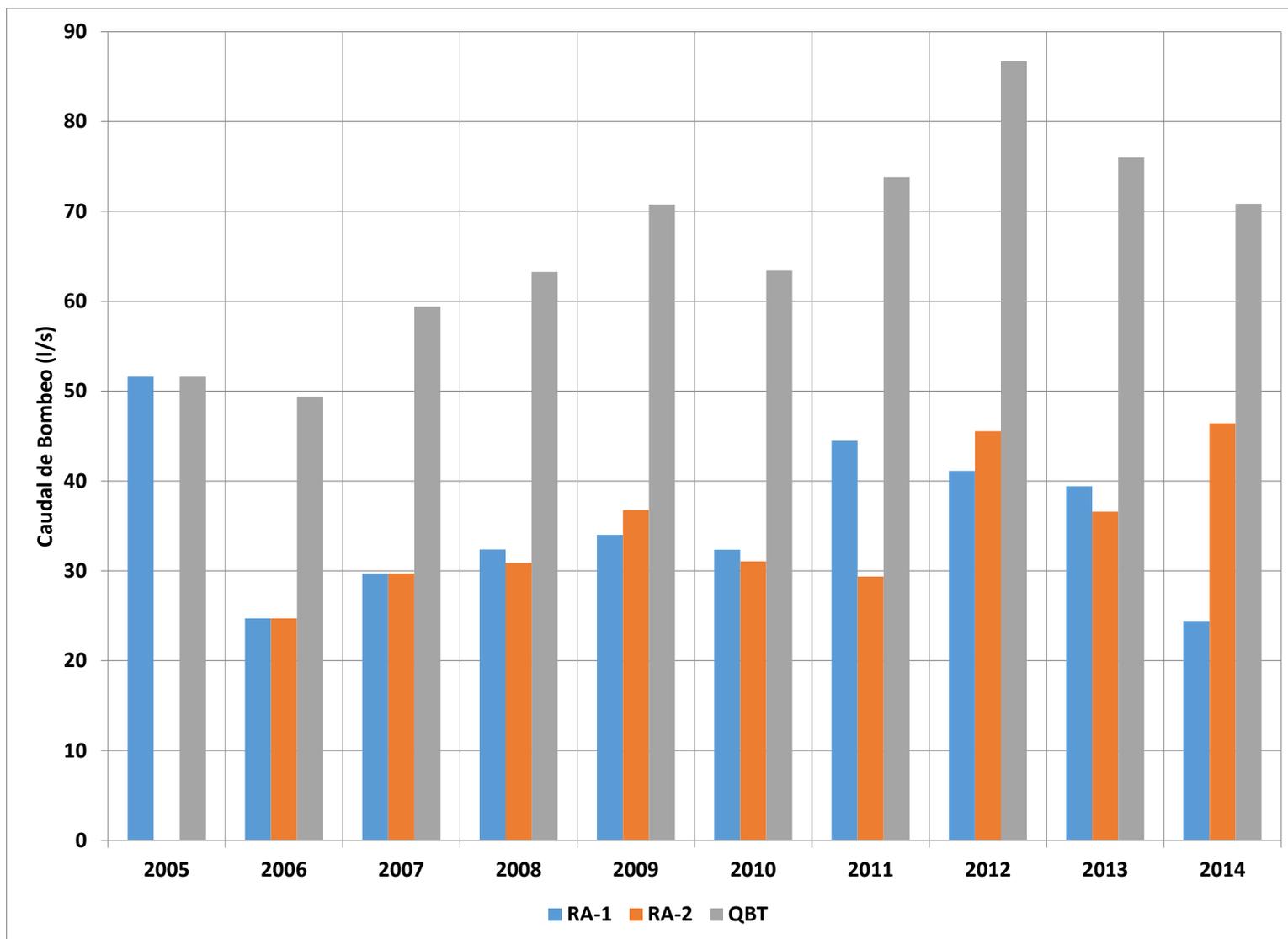
Fuente: Elaboración Propia

Figura 4.2
Correlación estratigráfica basada en niveles de limo-arcilla presente en pozos de bombeo



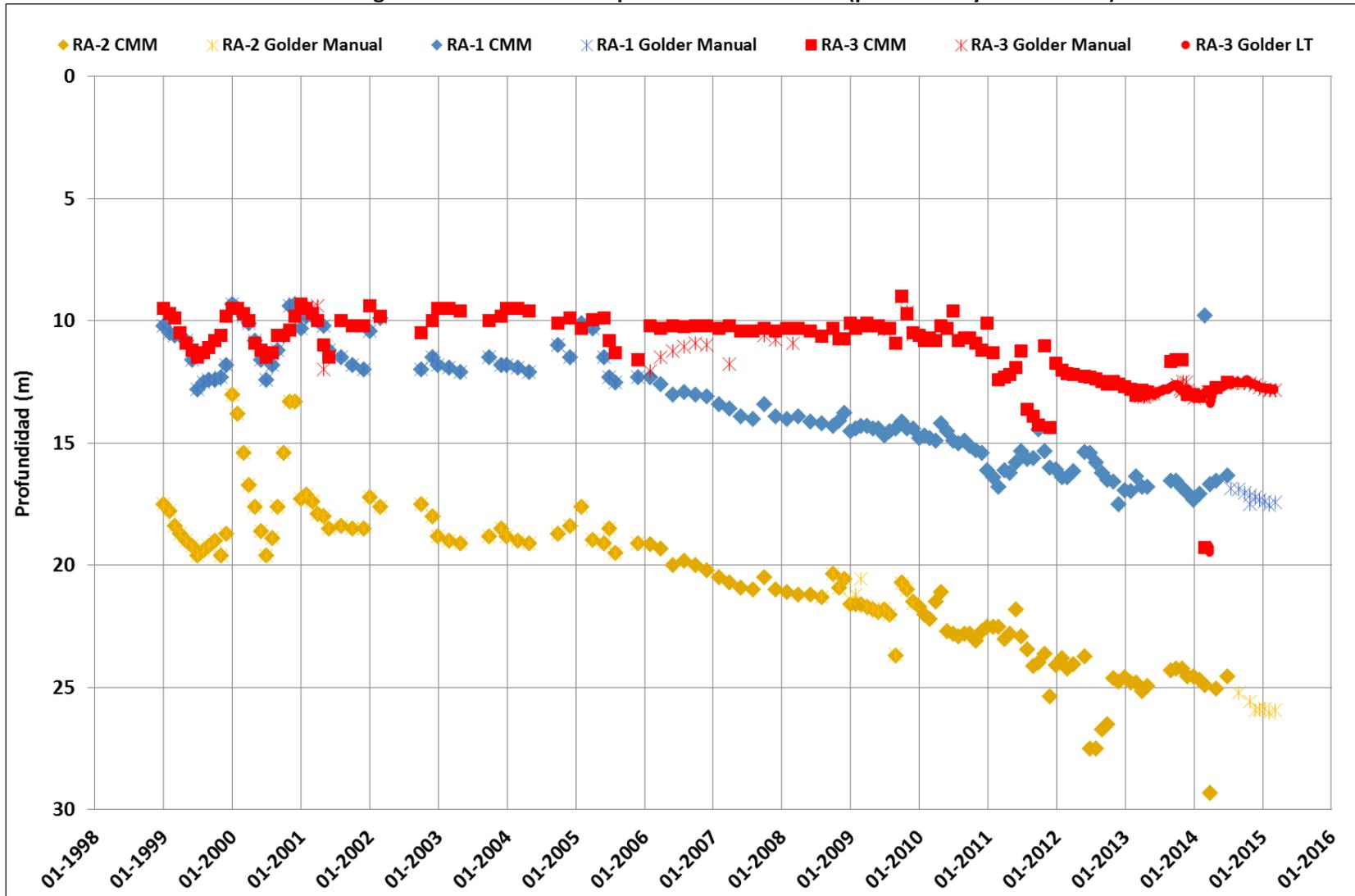
Fuente: EIA Proyecto Minero Refugio (1994)

Figura 4.3
Caudales de Bombeo desde Pozos RA-1 y RA-2 (2005 a 2014)



Fuente: Elaboración Propia a partir de datos de CMM y GOLDER

Figura 4.4
Niveles de Agua Subterránea en Campo de Pozos Pantanillo (producción y observación)



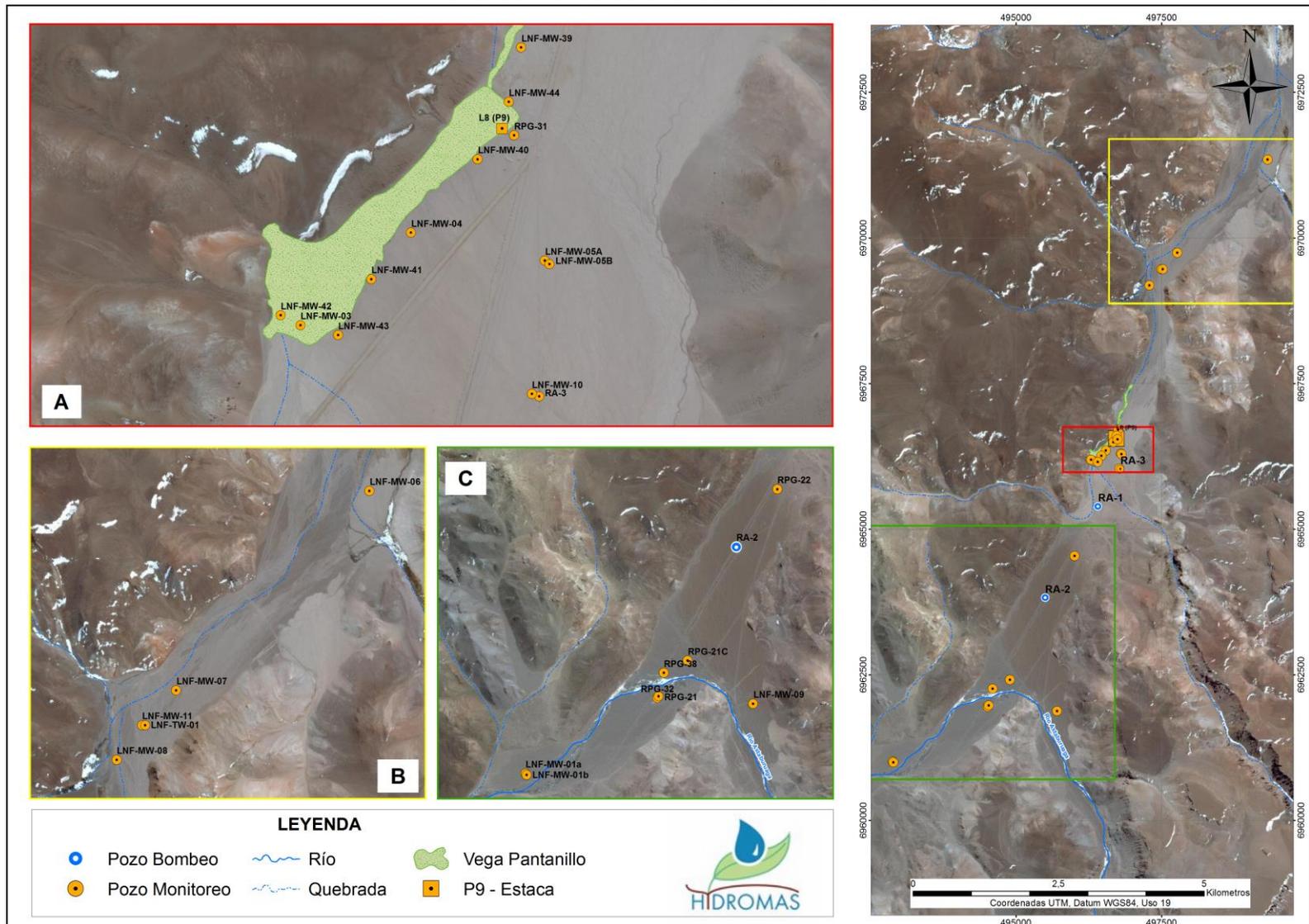
Fuente: Elaboración propia en base a información de CMM y Golder

Figura 4.5
Ubicación de Punto de Control de Aguas Superficiales en Humedal Pantanillo



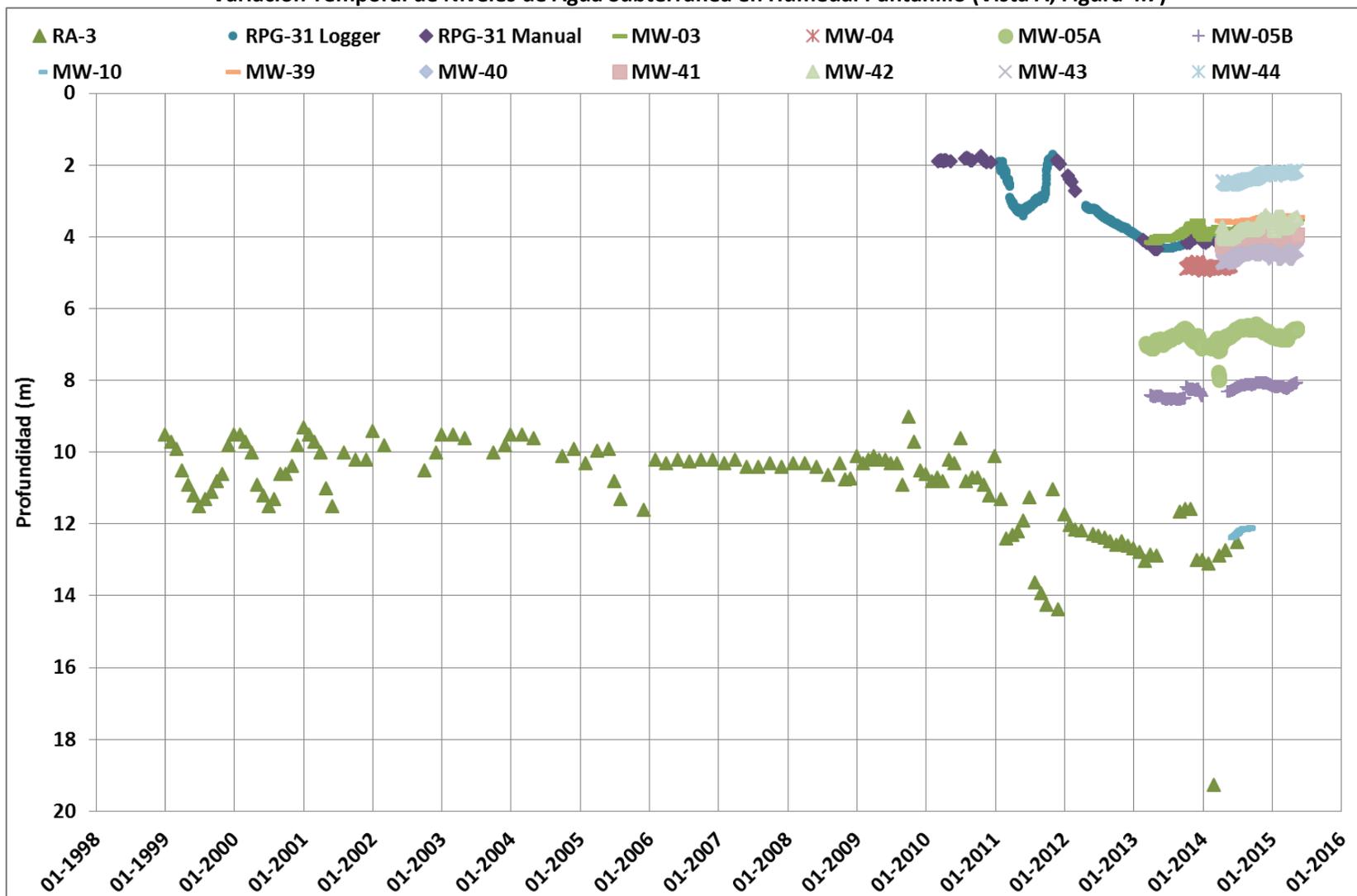
Fuente: Elaboración propia

Figura 4.7
Pozos de Monitoreo en el Sistema Pantanillo



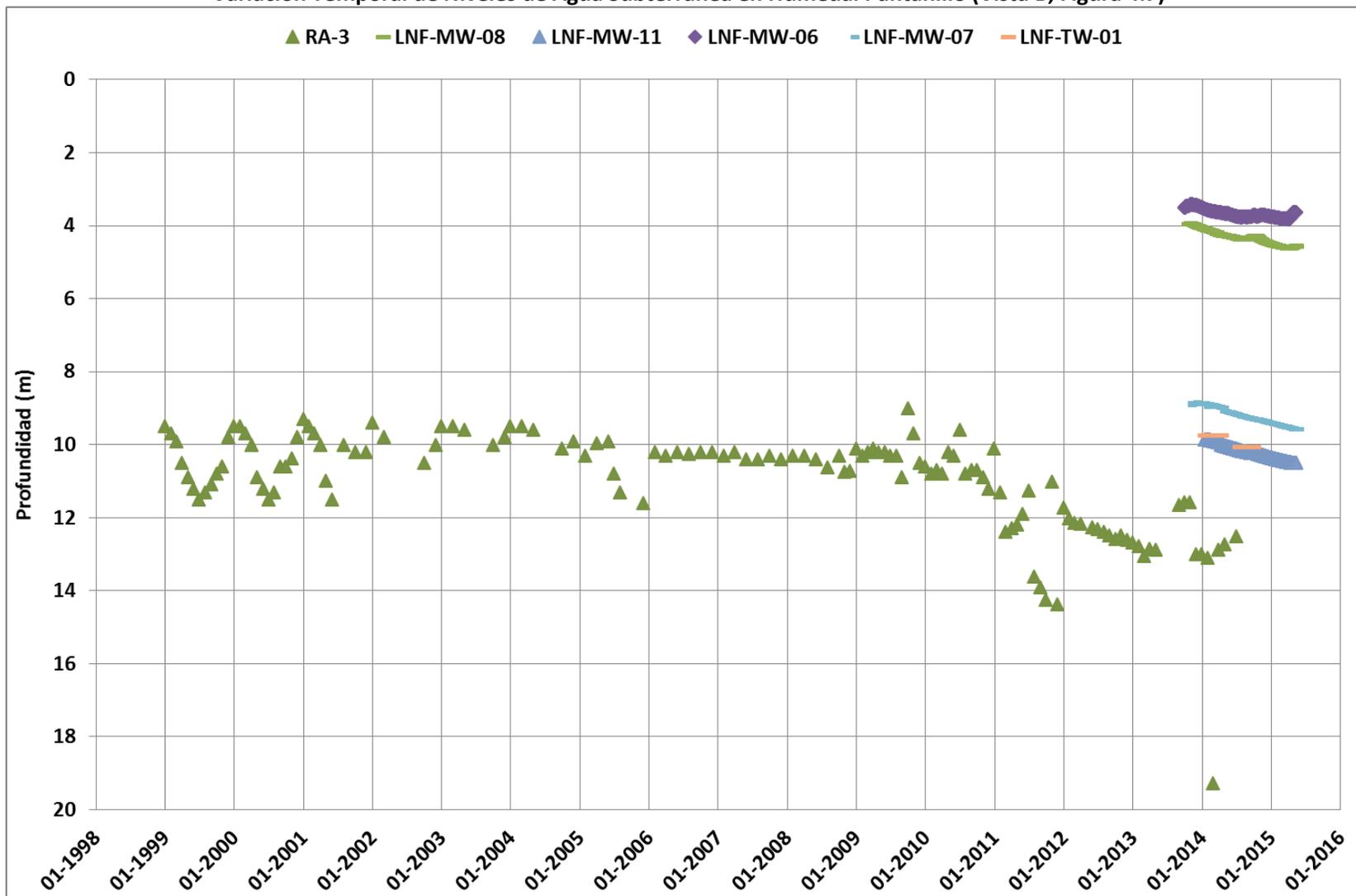
Fuente: Elaboración propia en base a información de CMM y Golder

Figura 4.8
 Variación Temporal de Niveles de Agua Subterránea en Humedal Pantanillo (Vista A, Figura 4.7)



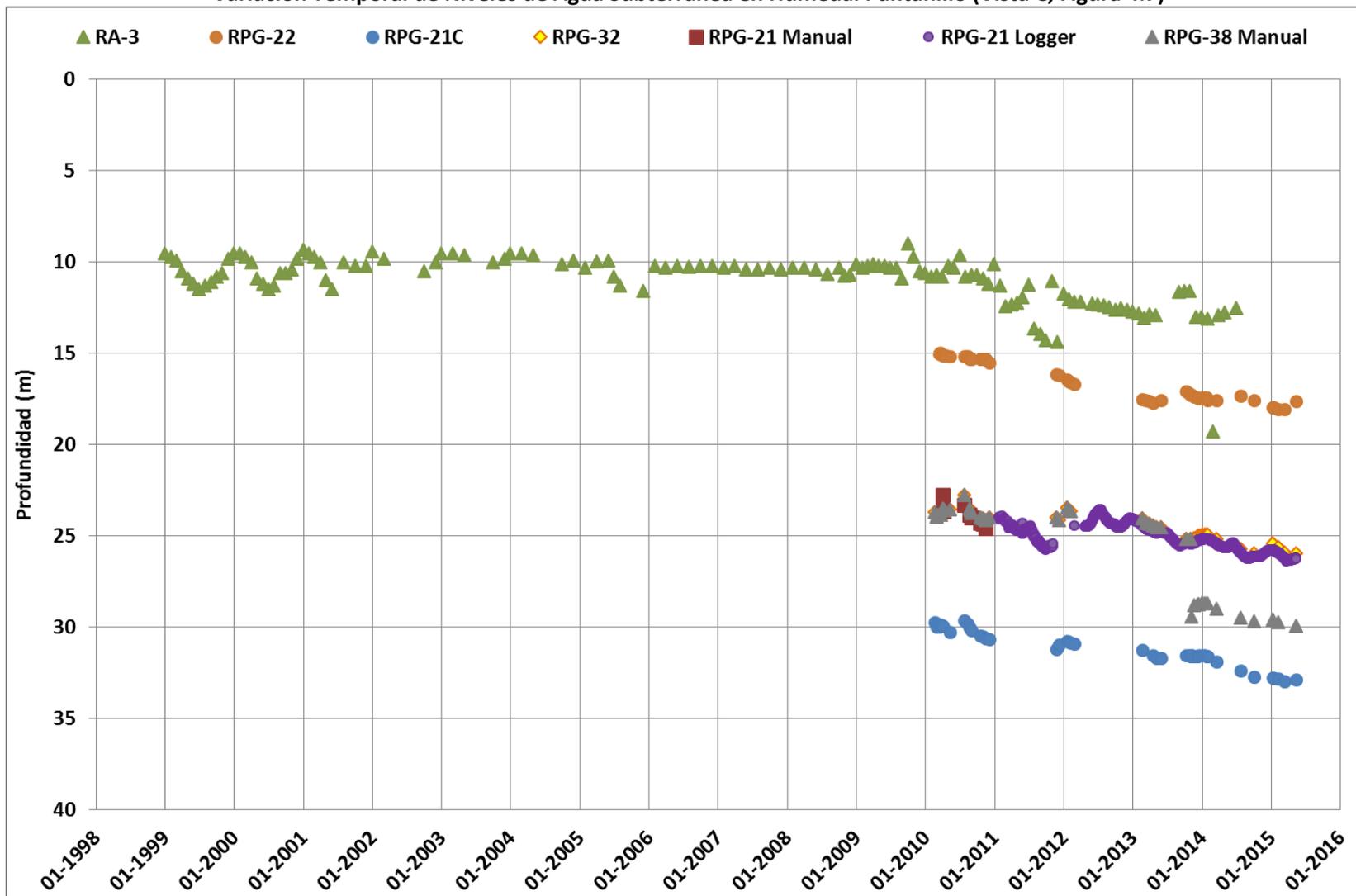
Fuente: Elaboración propia en base a información de CMM y Golder

Figura 4.9
 Variación Temporal de Niveles de Agua Subterránea en Humedal Pantanillo (Vista B, Figura 4.7)



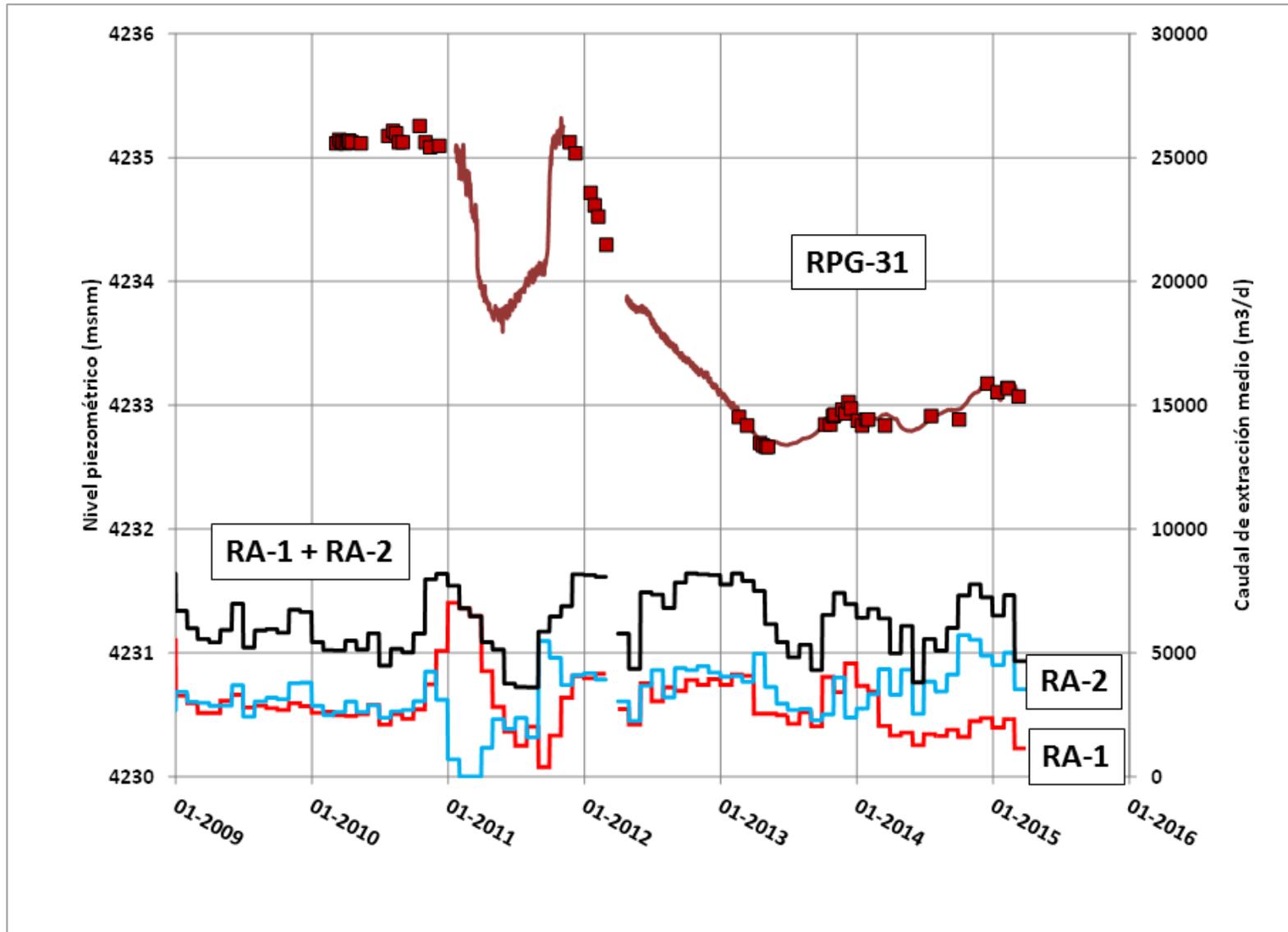
Fuente: Elaboración propia en base a información de CMM y Golder

Figura 4.10
Variación Temporal de Niveles de Agua Subterránea en Humedal Pantanillo (Vista C, Figura 4.7)



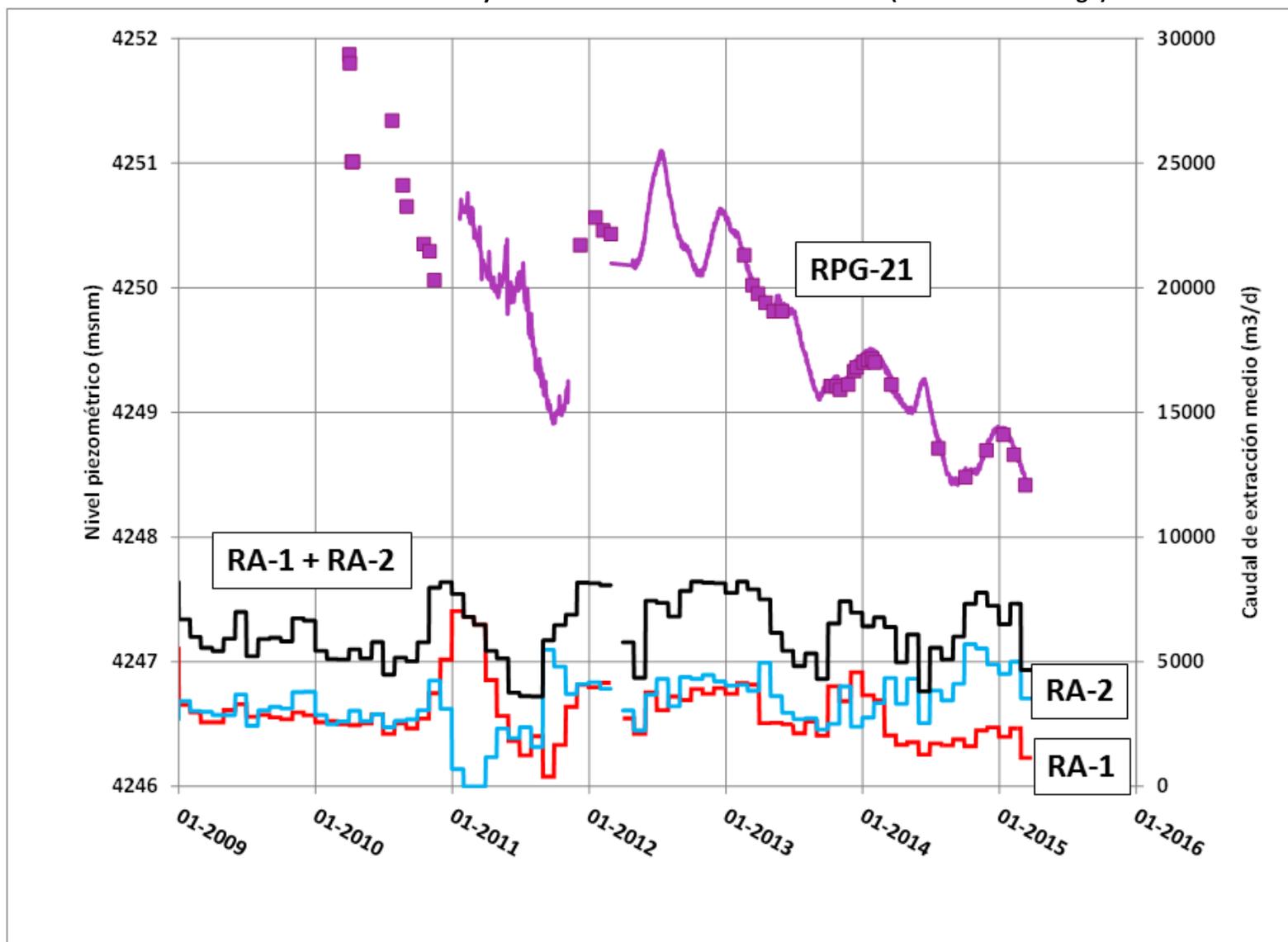
Fuente: Elaboración propia en base a información de CMM y Golder

Figura 4.11
Efecto del Bombeo en RA-1 y RA-2 sobre Pozo de Monitoreo RPG-31 (Norte Vega Pantanillo)



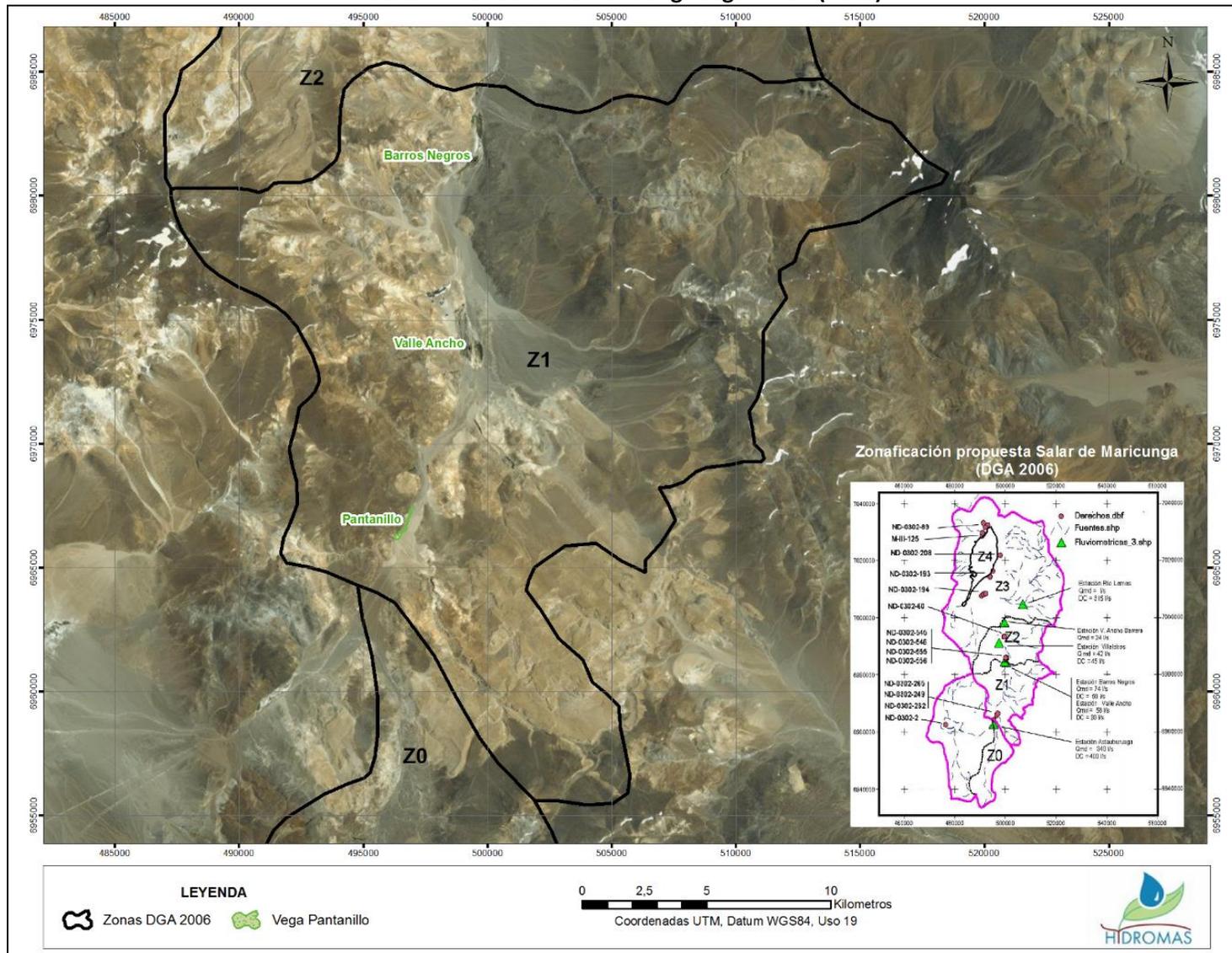
Fuente: Elaboración propia en base a información de CMM y Golder

Figura 4.12
Efecto del Bombeo en RA-1 y RA-2 sobre Pozo de Monitoreo RPG-21 (Sur Río Astaburuaga)



Fuente: Elaboración propia en base a información de CMM y Golder

Figura 5.1
Sector Z1 en Salar de Maricunga según DGA (2006)



Fuente: Elaboración propia

Figura 5.2
Balance Hídrico Sector Z1

Recarga

Z1							
Banda de Altura msnm	Area Km2	Altura Promedio msnm	Temp °C	Precipitación mm	Evapotransp mm	Escorrentia	
						mm	m3/s
4000-4200	48.7	4100	1.3	110	109.5	0.5	0.001
4200-4400	108.2	4300	-0.1	130	124.5	5.5	0.019
4400-4600	127.3	4500	-1.5	150	135.4	14.6	0.059
4600-4800	91.2	4700	-2.9	170	140.5	29.5	0.085
4800-5000	63.6	4900	-4.3	190	137.3	52.7	0.106
5000-5200	28.6	5100	-5.7	210	123.2	86.8	0.079
5200-5400	18.3	5300	-7.1	230	96.0	134.0	0.078
TOTAL	485.9						0.427

Descarga

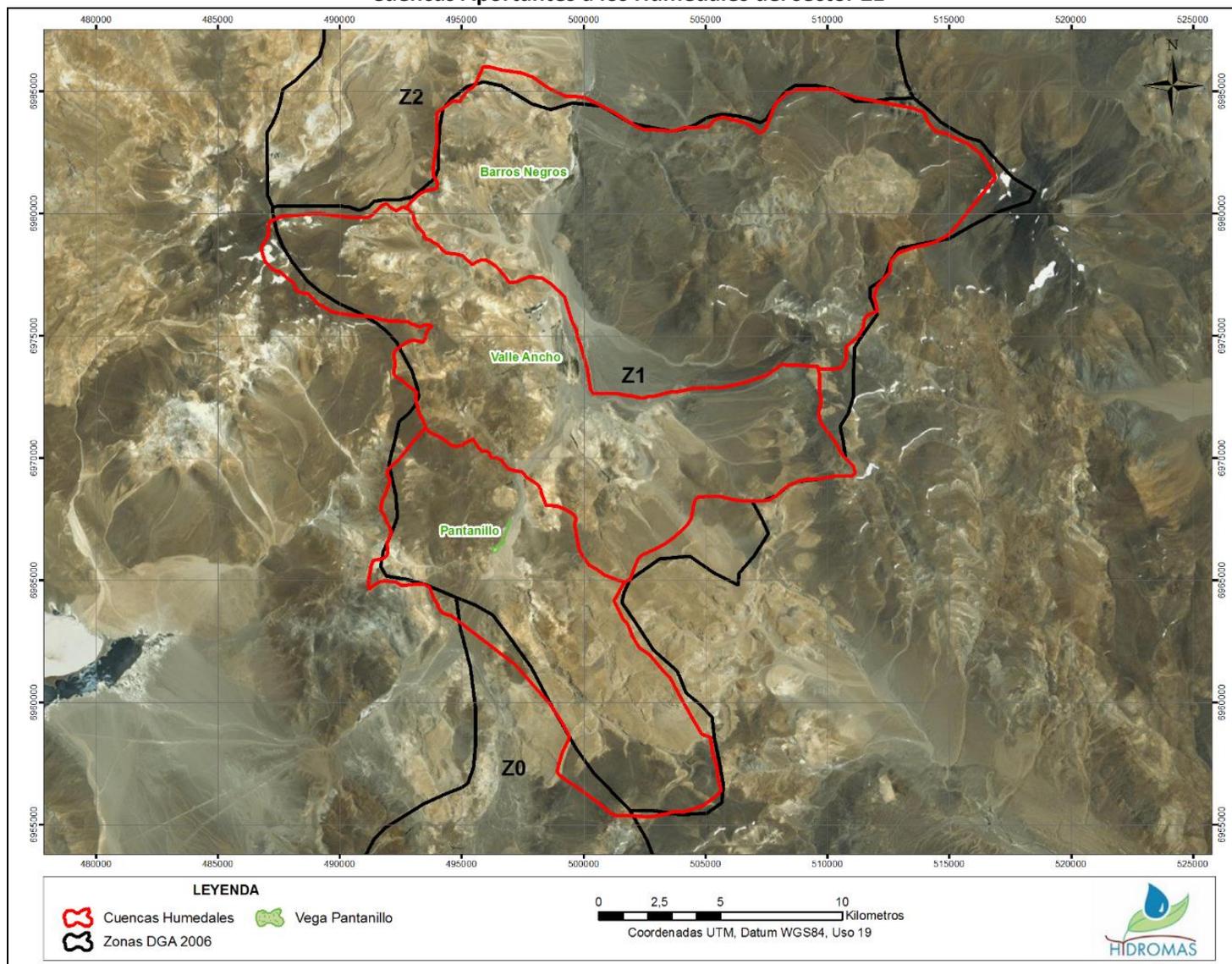
Humedal	Area (km2)	Evapotraspiración (l/s)
H1	2.1	104
H2	1	49
TOTAL	3.1	153

Balance

$$E_{ts} = 427 - 153 = 274 \text{ l/s}$$

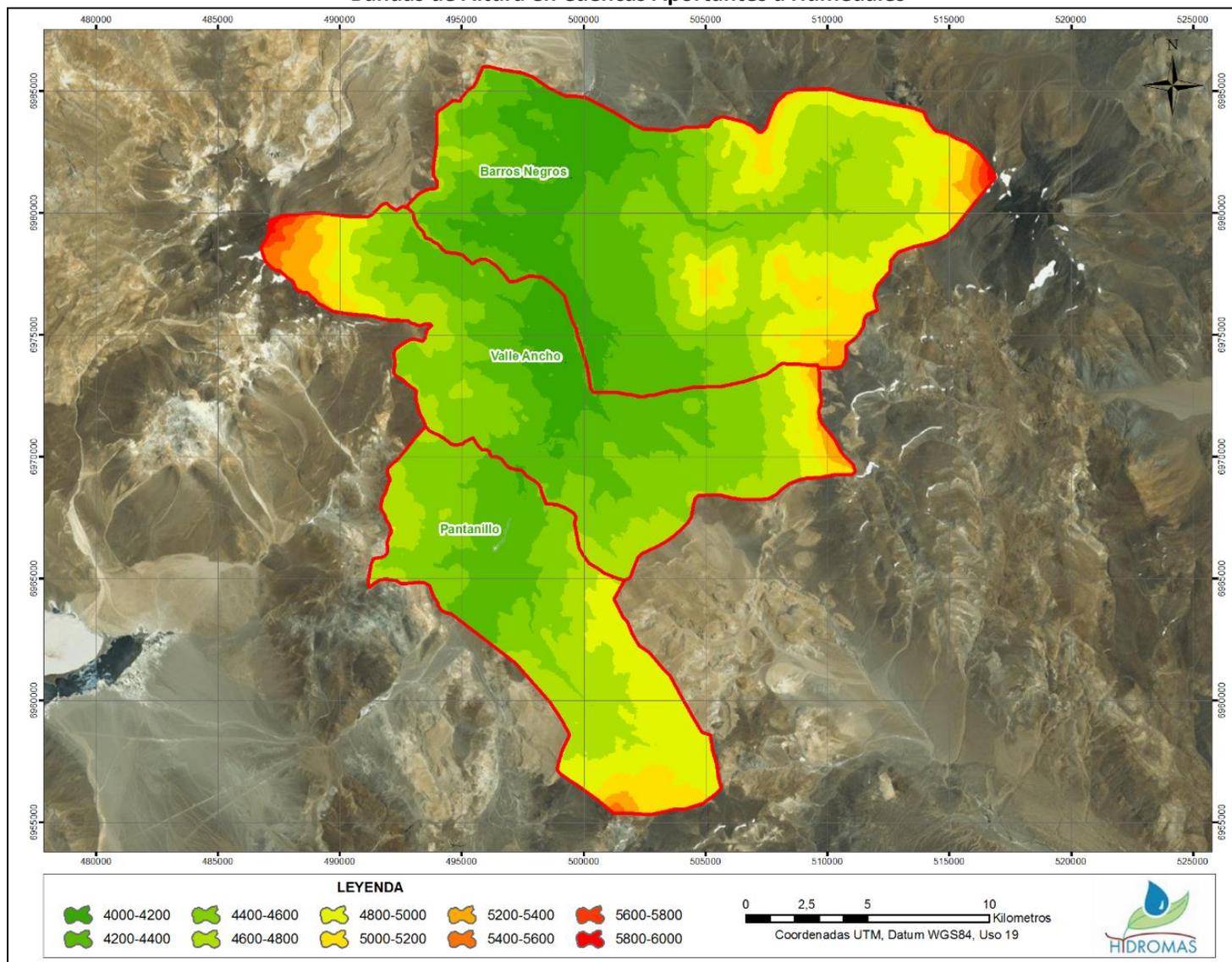
Fuente: Elaboración propia en base a SDT N° 226, DGA 2006

Figura 5.3
Cuencas Aportantes a los Humedales del sector Z1



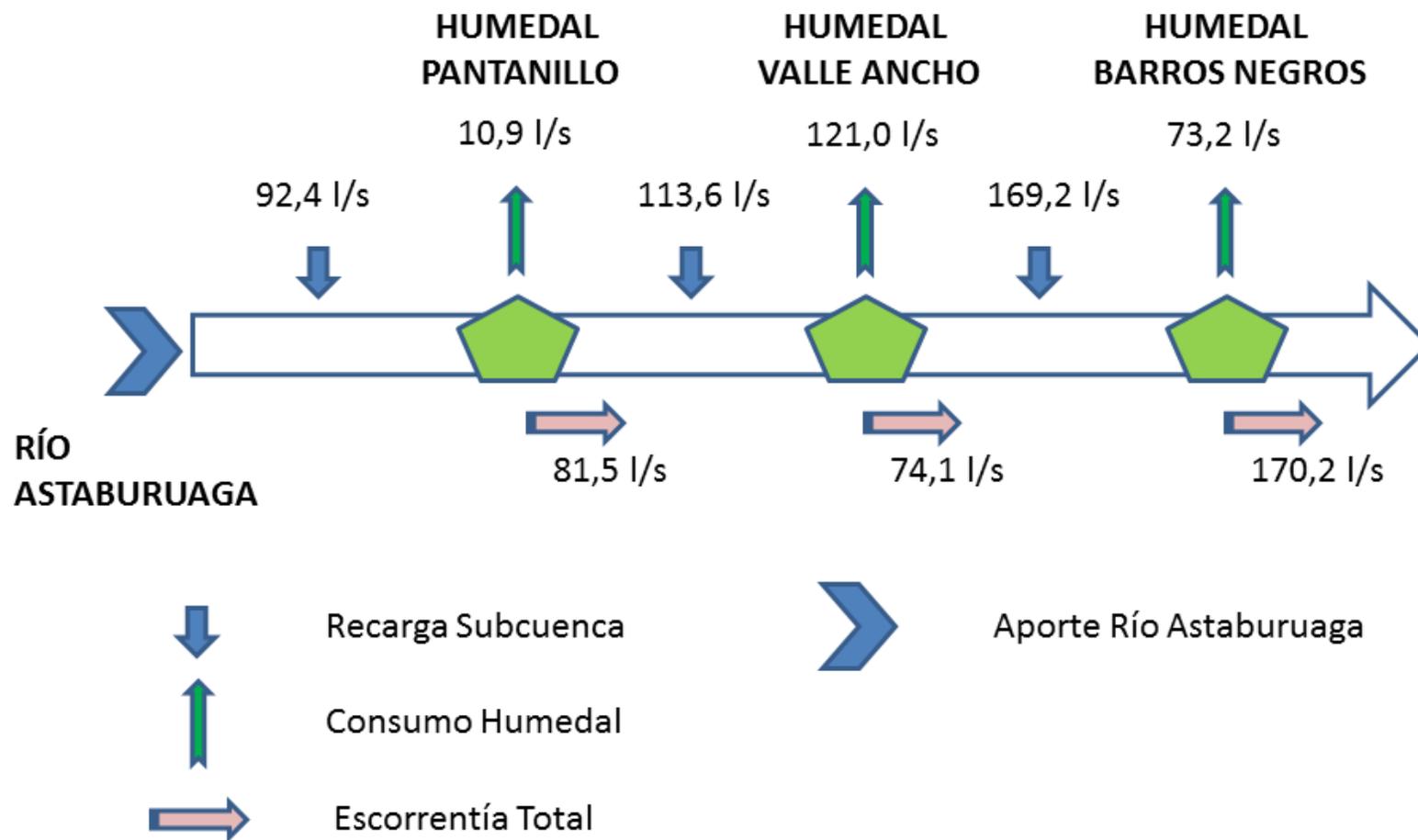
Fuente: Elaboración propia en base a SDT N° 226, DGA 2006

Figura 5.4
Bandas de Altura en Cuencas Aportantes a Humedales



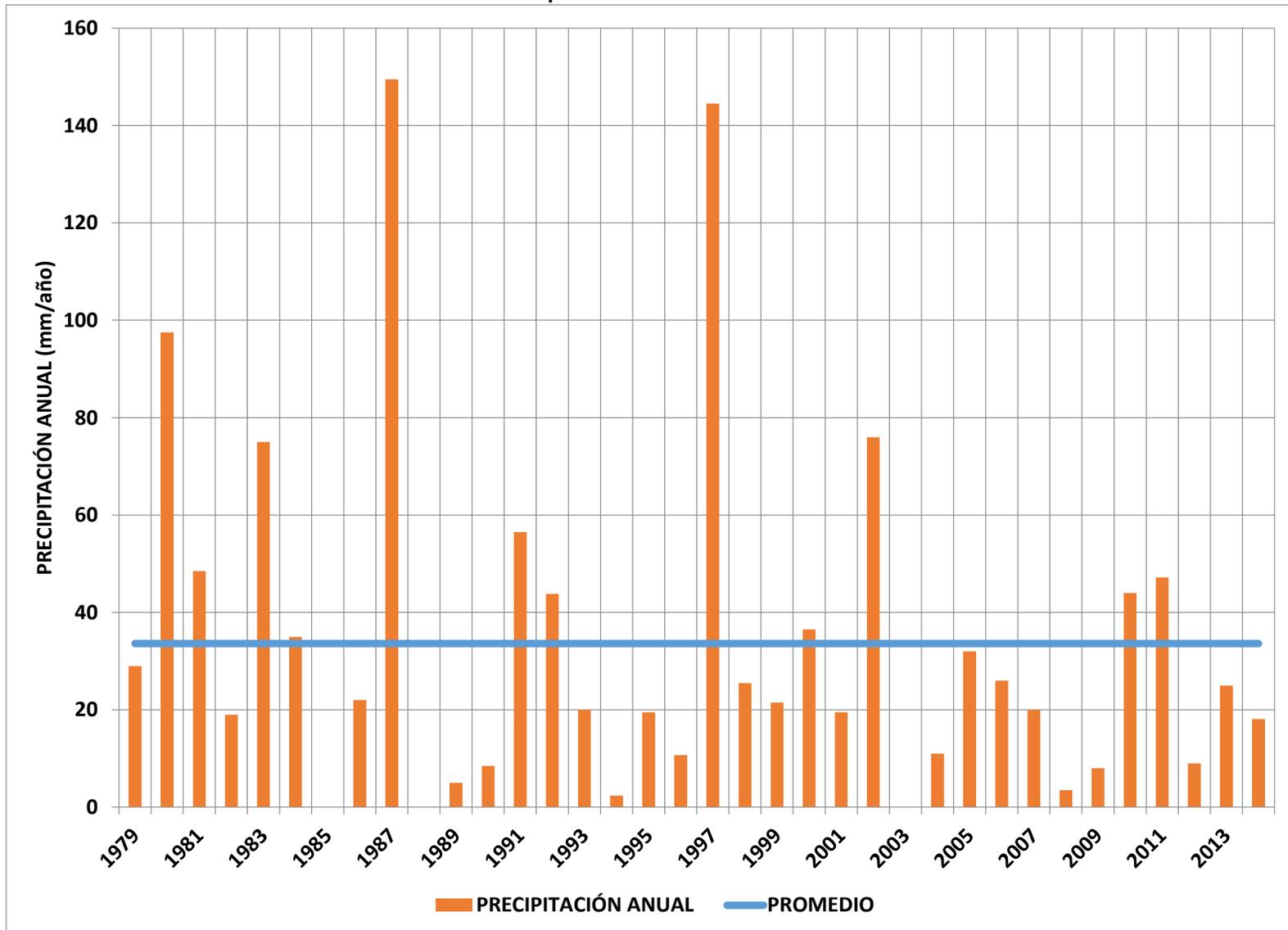
Fuente: Elaboración propia en base a SDT N° 226, DGA 2006

Figura 5.5
Balance Hídrico en Condición Natural



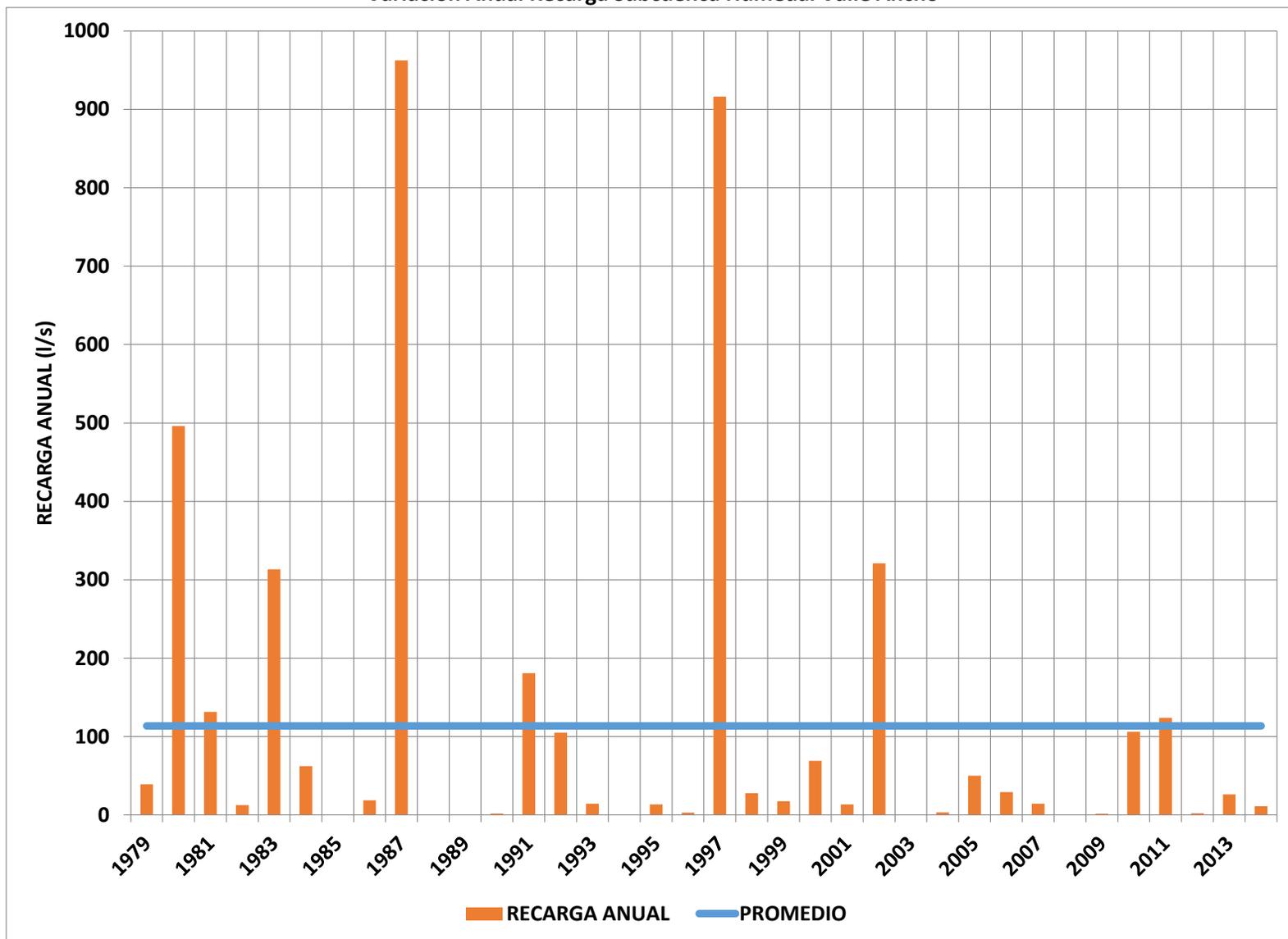
Fuente: Elaboración propia

Figura 5.6
Variación Anual Precipitación Anual en Estación Pastos Grandes



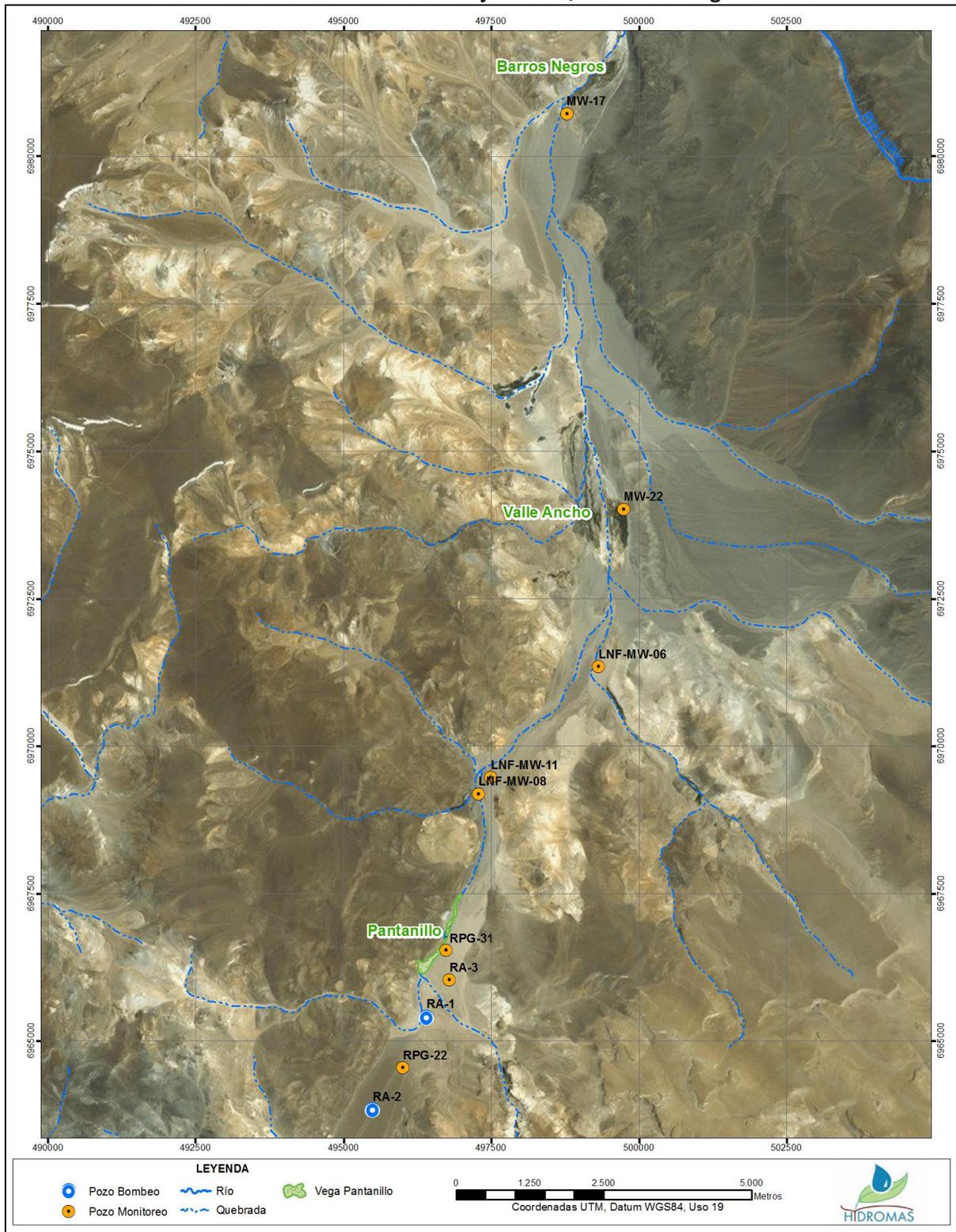
Fuente: Elaboración propia

Figura 5.7
Variación Anual Recarga Subcuenca Humedal Valle Ancho



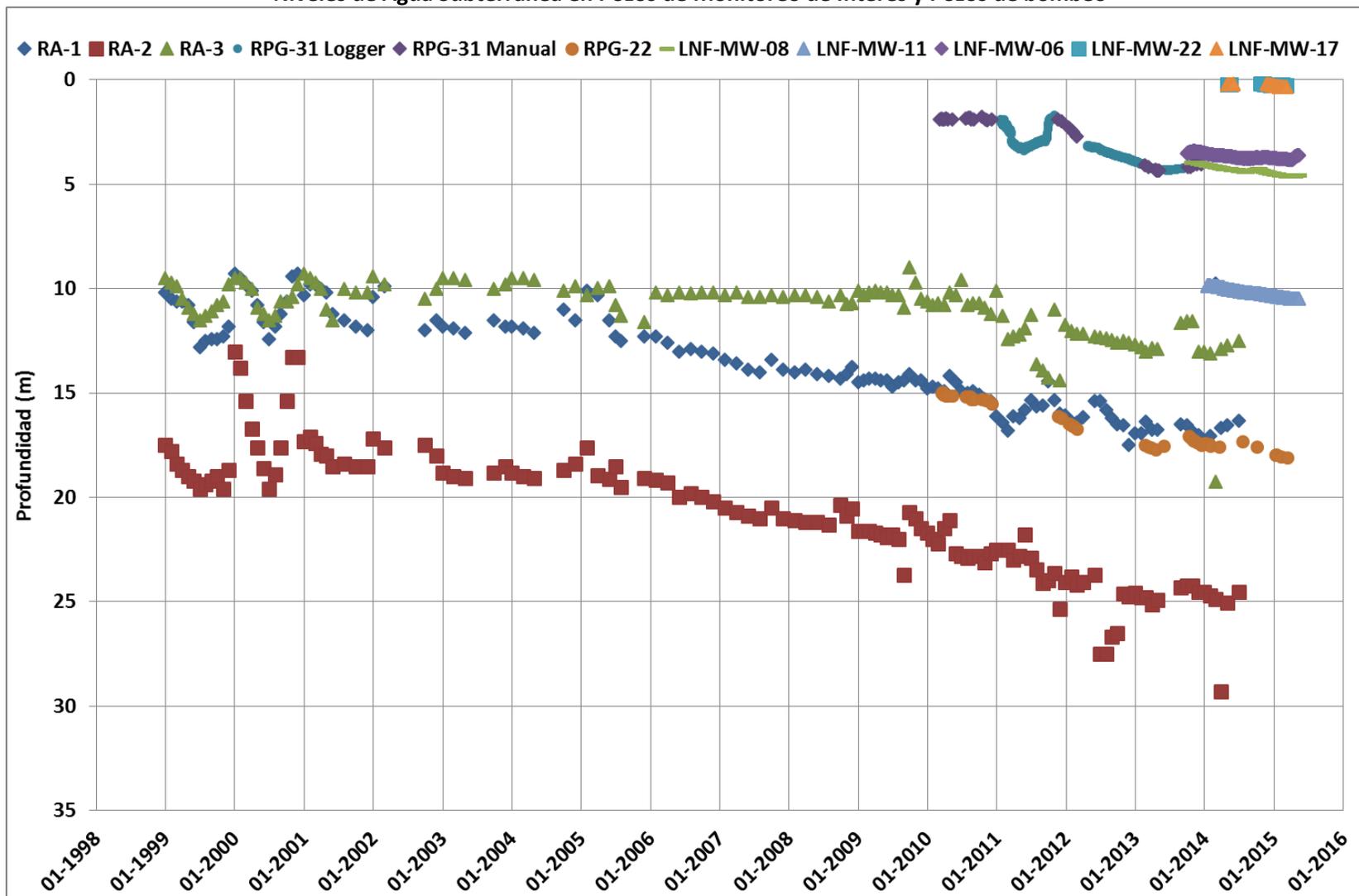
Fuente: Elaboración propia

Figura 6.1
Pozos de Monitoreo de Interés en Eje de la Quebrada Ciénaga Redonda



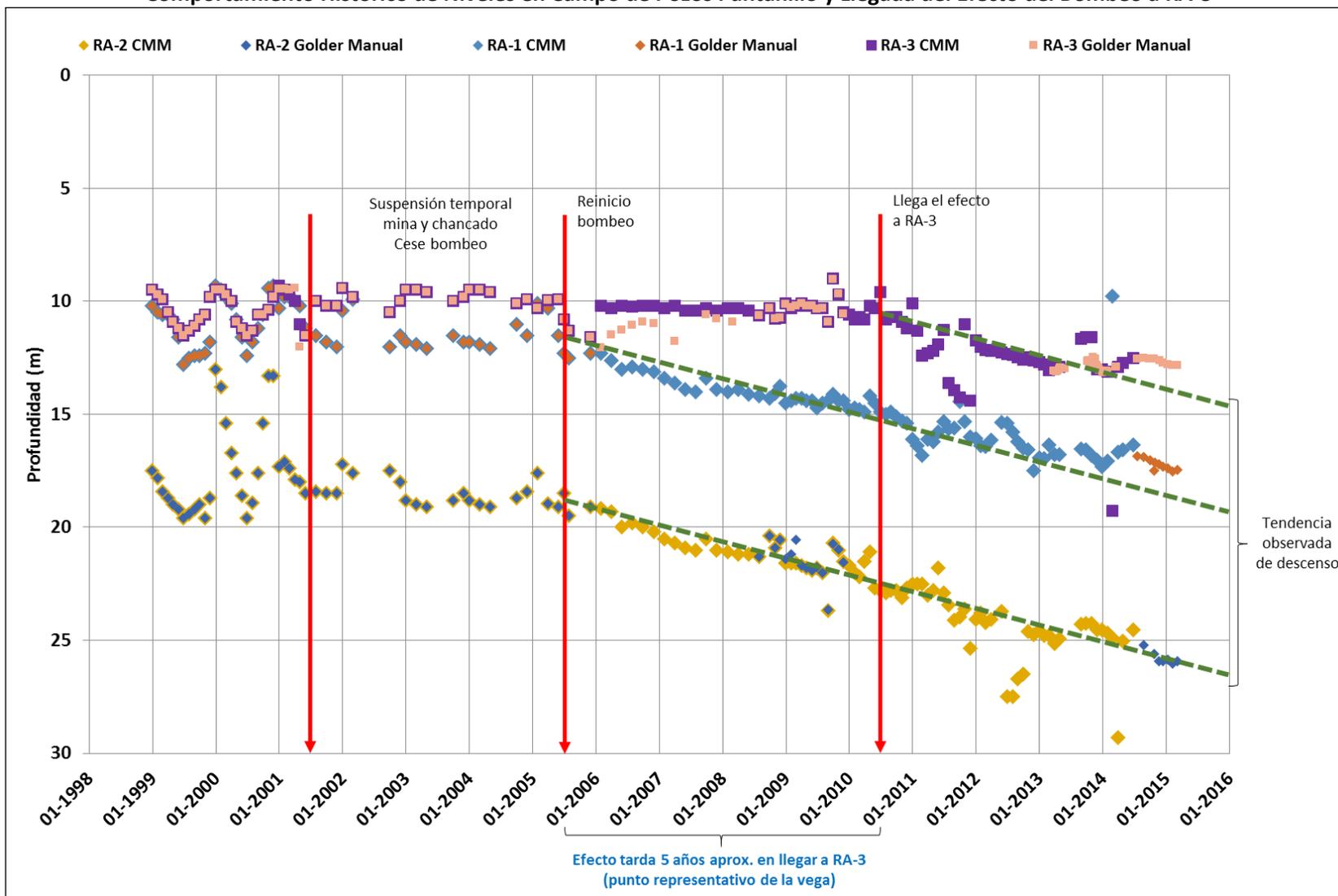
Fuente: Elaboración propia en base a información de CMM y Golder

Figura 6.2
Niveles de Agua Subterránea en Pozos de Monitoreo de Interés y Pozos de bombeo



Fuente: Elaboración propia en base a información de CMM y Golder

Figura 6.3
Comportamiento Histórico de Niveles en Campo de Pozos Pantanillo y Llegada del Efecto del Bombeo a RA-3



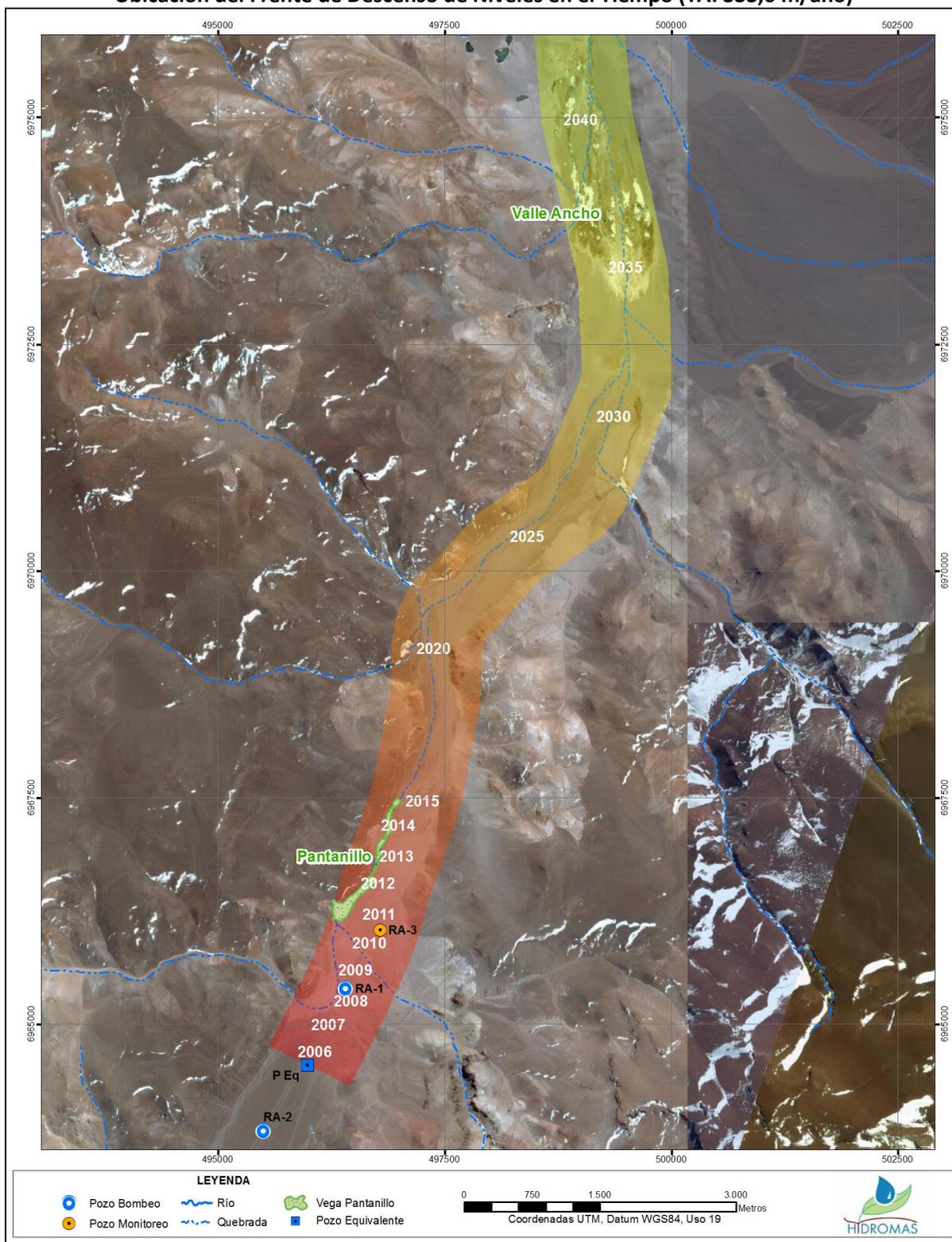
Fuente: Elaboración propia

Figura 6.4
Ubicación de Pozo de Bombeo Equivalente en el Campo de Pozos Pantanillo



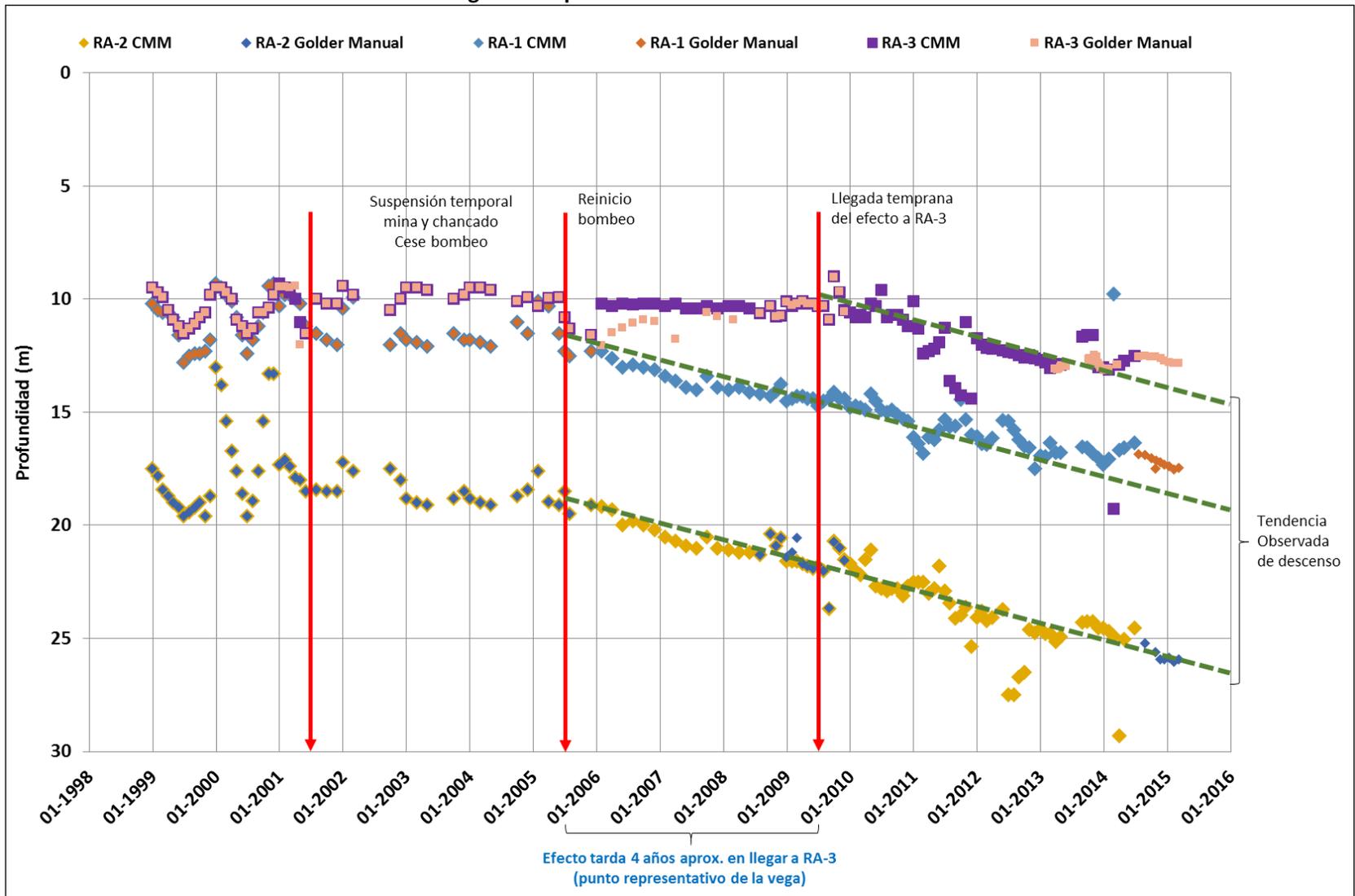
Fuente: Elaboración propia

Figura 6.5
Ubicación del Frente de Descenso de Niveles en el Tiempo (TA: 333,6 m/año)



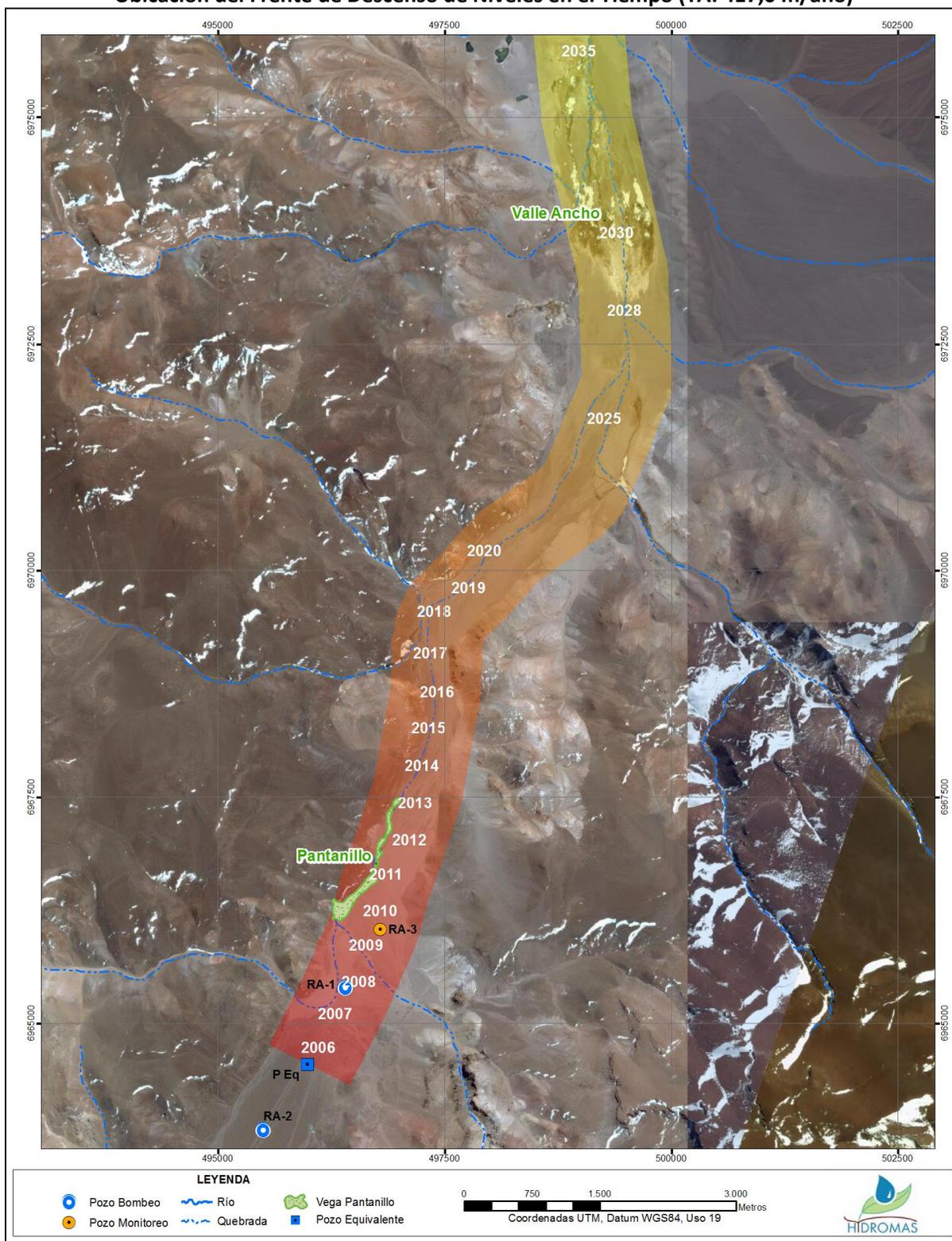
Fuente: Elaboración propia

Figura 6.6
Llegada Temprana del Efecto del Bombeo a RA-3



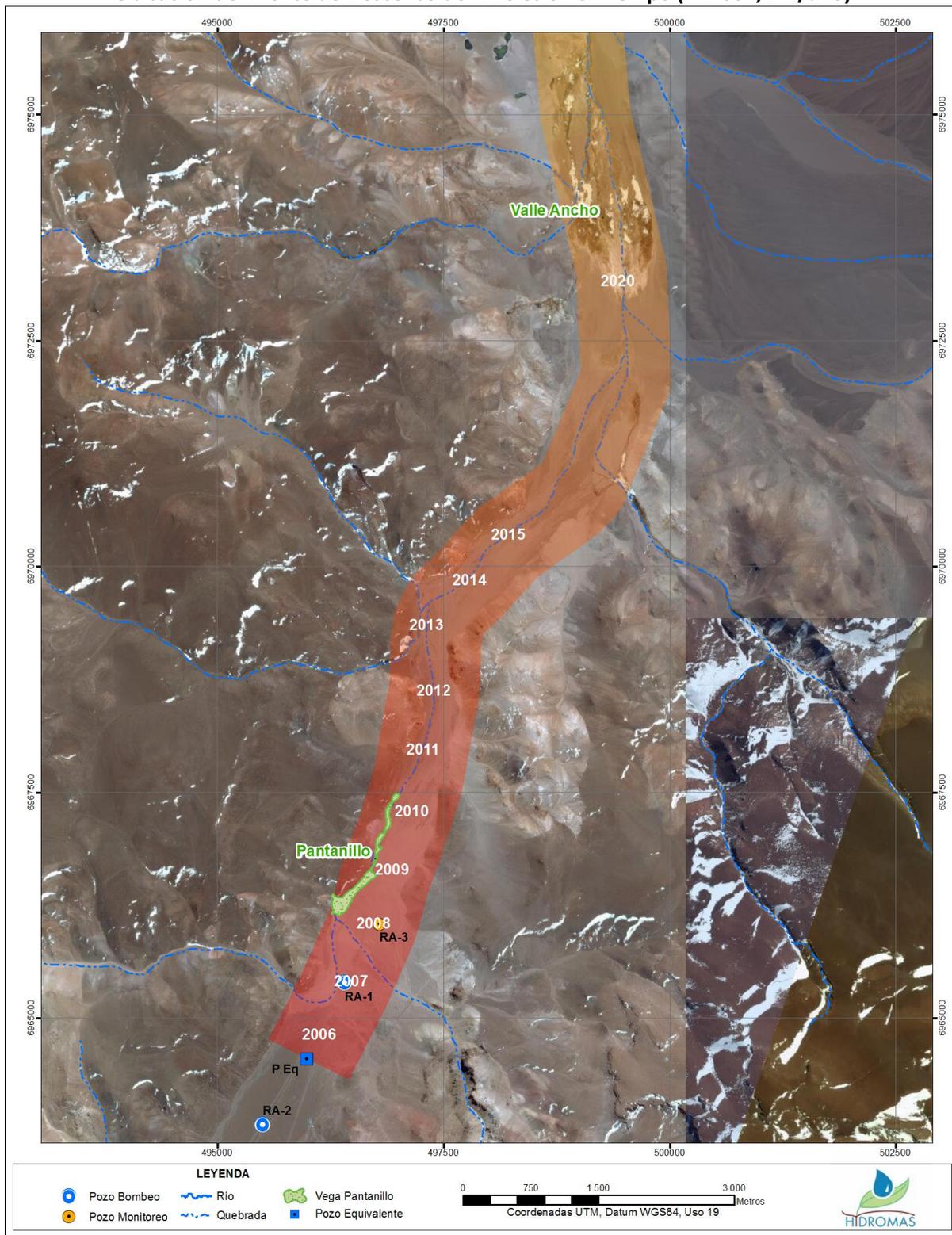
Fuente: Elaboración propia

Figura 6.7
Ubicación del Frente de Descenso de Niveles en el Tiempo (TA: 417,0 m/año)



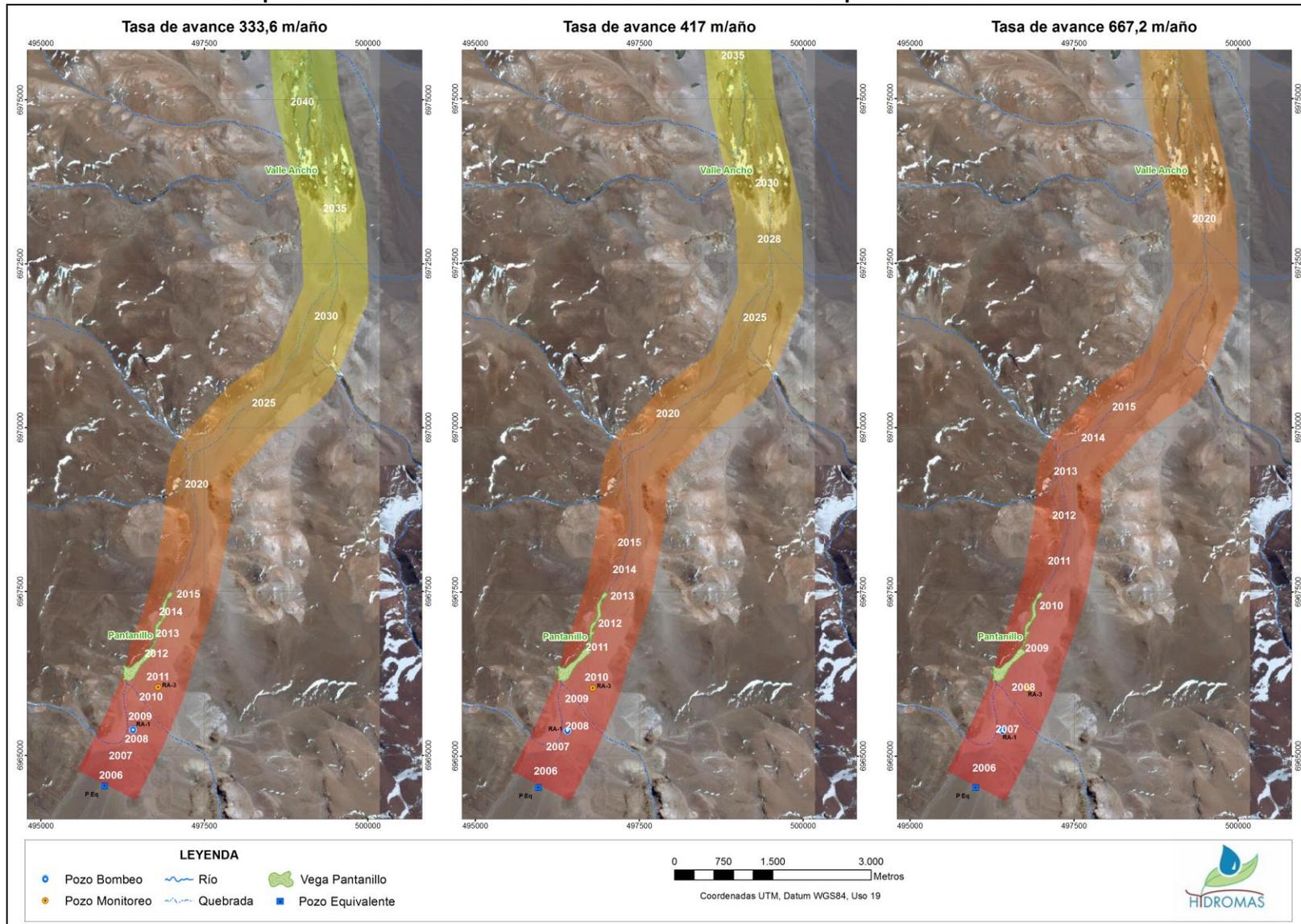
Fuente: Elaboración propia

Figura 6.8
Ubicación del Frente de Descenso de Niveles en el Tiempo (TA: 667,2 m/año)



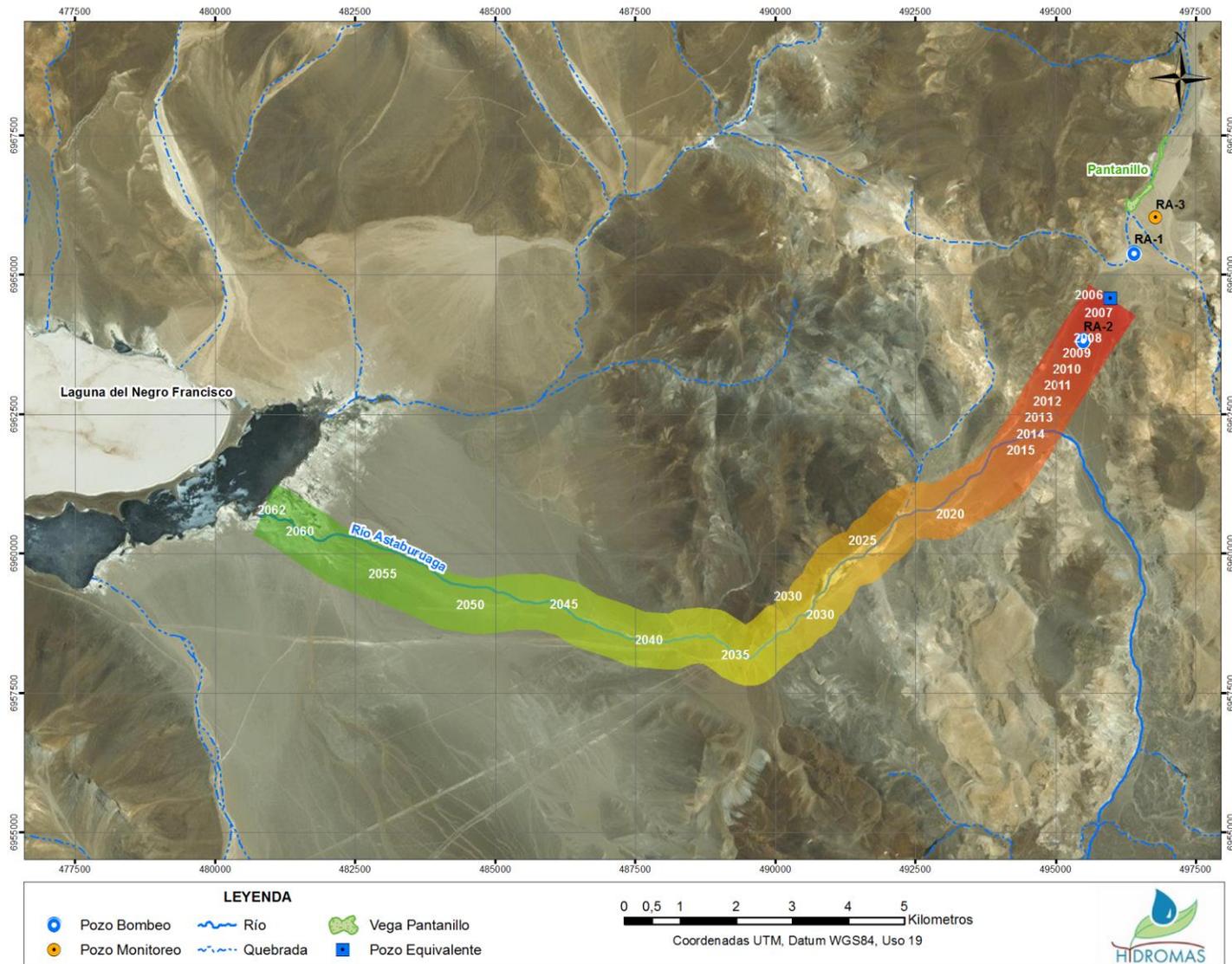
Fuente: Elaboración propia

Figura 6.9
Comparación de la Ubicación del Frente de Descenso de Niveles para Cada Tasa de Avance



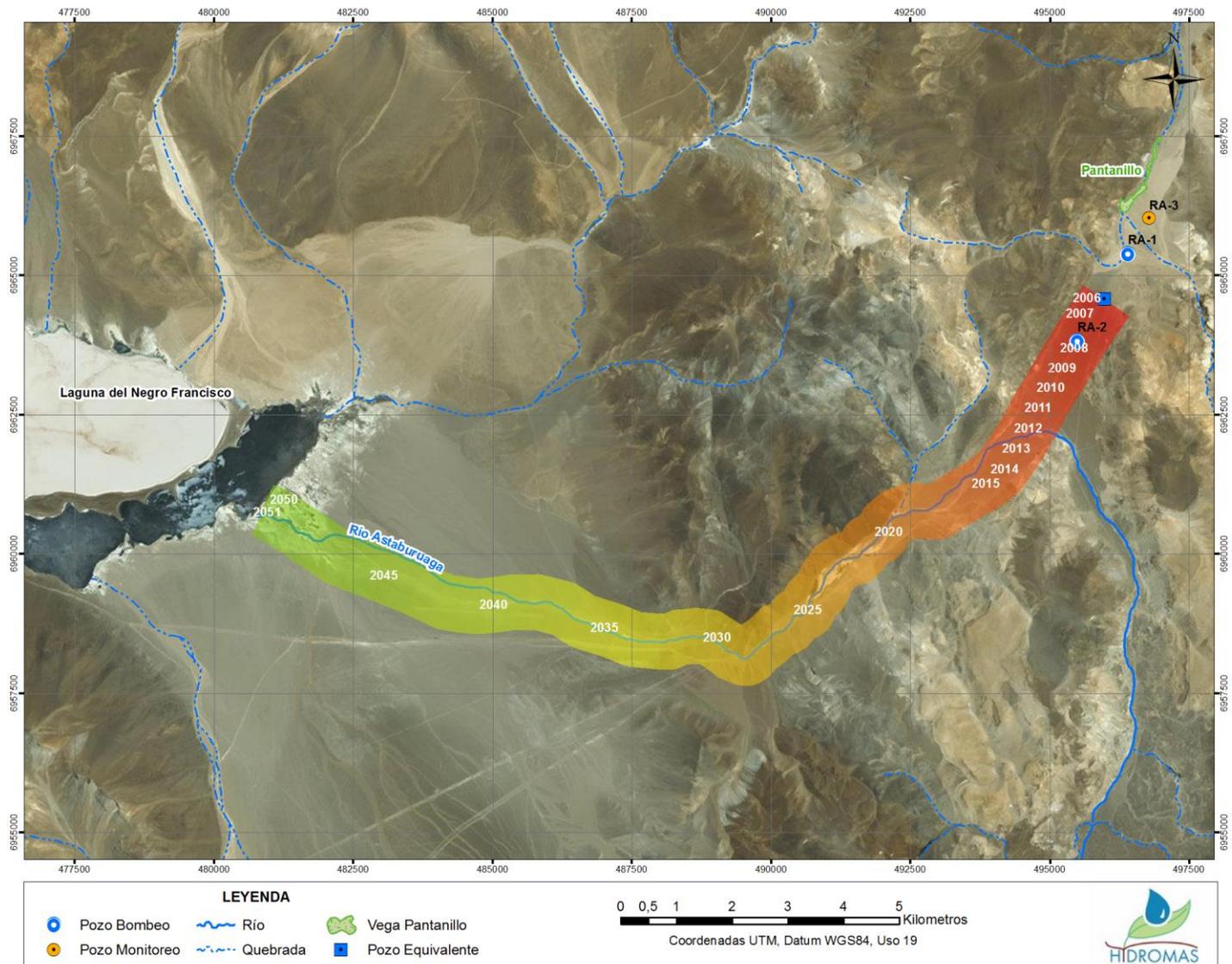
Fuente: Elaboración propia

Figura 6.10
Ubicación del Frente de Descenso de Niveles en el Tiempo (TA: 333,6 m/año)



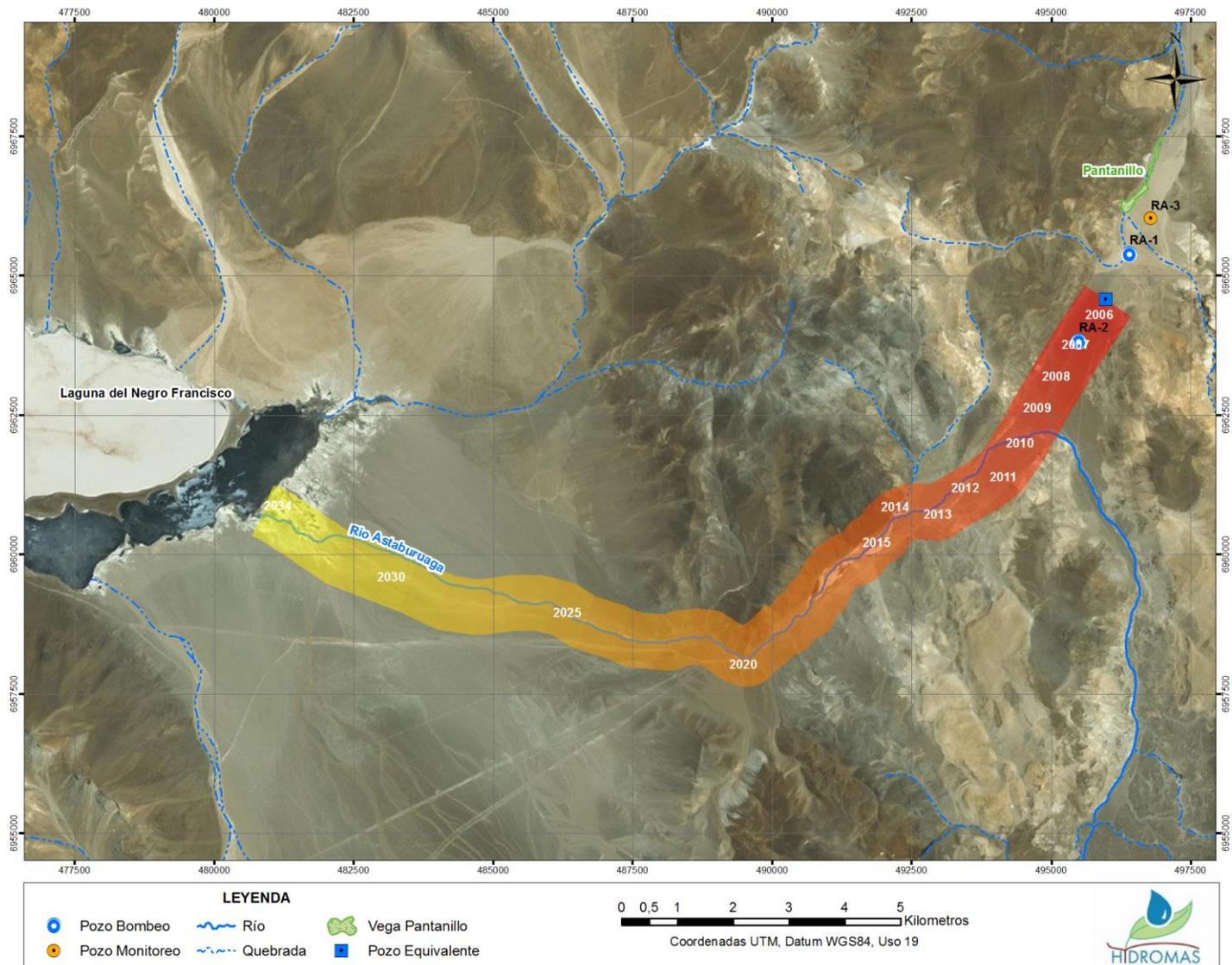
Fuente: Elaboración propia

Figura 6.11
Ubicación del Frente de Descenso de Niveles en el Tiempo (TA: 417,0 m/año)



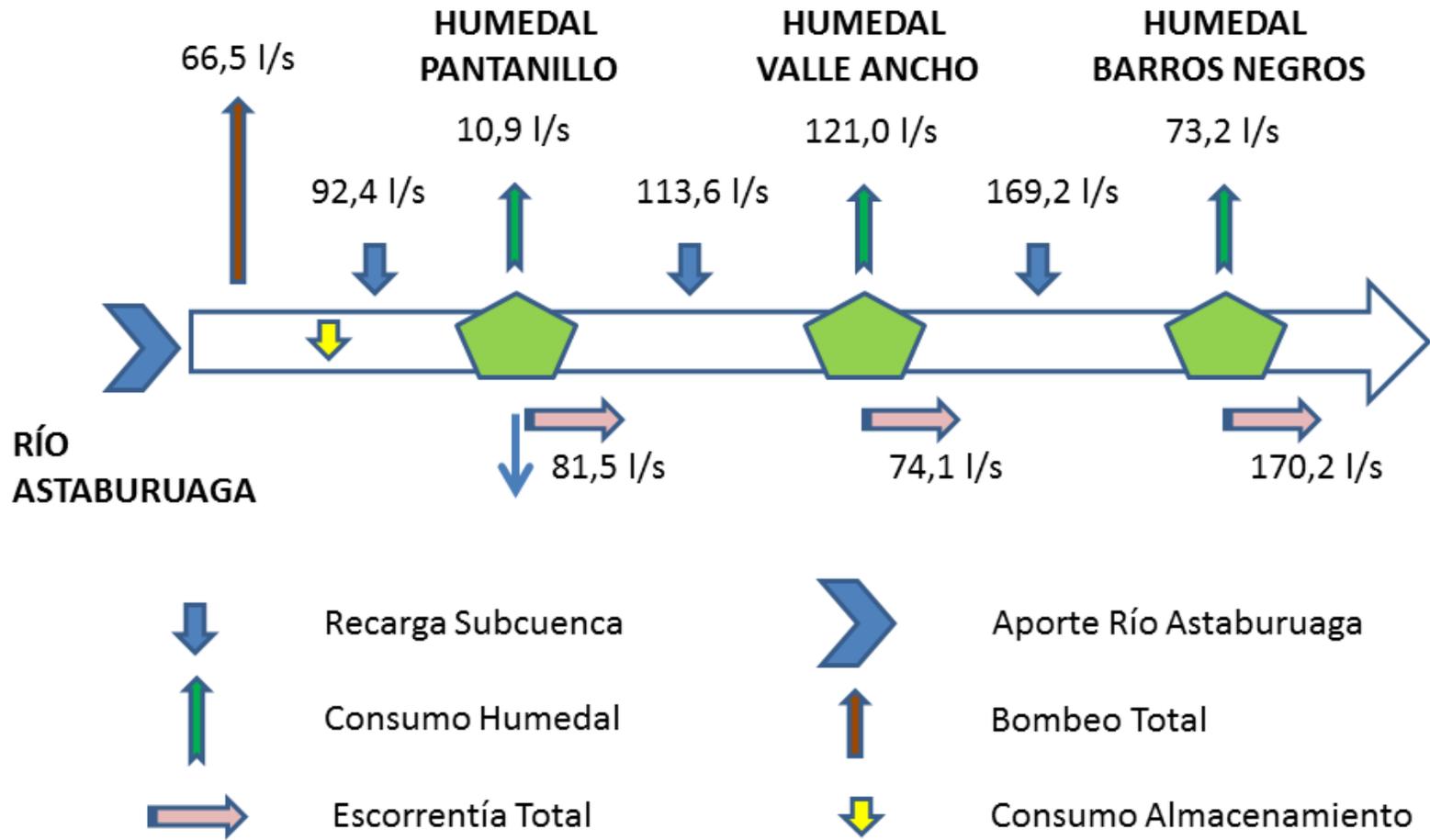
Fuente: Elaboración propia

Figura 6.12
Ubicación del Frente de Descenso de Niveles en el Tiempo (TA: 667,2 m/año)



Fuente: Elaboración propia

Figura 6.13
Balance Hídrico en Condición con Bombeo



Fuente: Elaboración propia