



ANEXO 18: INFORME SUPERFICIES LACUSTRES



Datos de reconocimiento en terreno de superficies
lacustres – Campaña abril de 2017

Plan de Seguimiento Ambiental
Proyecto Cambios y Mejoras de la
Operación Minera en el Salar de Atacama

preparado para SQM Salar S.A.
diciembre 2017

geobiota

Plan de seguimiento ambiental
Medición de superficies lacustres - Campaña abril de 2017
GEOB.SQM469.INF03

Rev.	Id	Ejecutor	Revisor	Aprueba	Descripción
A	Nombre	JG	VB		Revisión Interna
	Fecha	30-06-2017	18-08-2017		
B	Nombre	JG/VB	JG/VB		Para Aprobación del Cliente
	Fecha	18-08-2017	21-08-2017		
C	Nombre	JG	VB	XA	Para Aprobación del Cliente
	Fecha	25-10-2017	25-10-2017	26-10-2017	
0	Nombre	JG	JG		Para Emisión
	Fecha	26-10-2017	26-10-2017		
1	Nombre	JG	VB	XA	Revisiones del cliente
	Fecha	04-12-2017	04-12-2017	04-12-2017	

Contenido

1.	RESUMEN	1
2.	INTRODUCCIÓN	2
3.	OBJETIVOS	3
4.	MATERIAL Y MÉTODO	4
4.1.	Descripción del área de estudio	4
4.2.	Ubicación de los puntos de control	6
4.3.	Parámetros para caracterizar el estado y evolución de las variables ambientales	9
4.4.	Metodología de medición y análisis	9
4.4.1.	Análisis de imágenes satelitales	10
4.4.1.1.	Fusión de imagen	10
4.4.1.2.	Transformaciones multiespectrales	11
4.4.2.	Digitalización de contornos	14
4.4.3.	Control de terreno	15
4.4.4.	Delimitación de los contornos de las superficies lacustres	15
4.5.	Materiales y equipos utilizados	17
4.6.	Fechas de muestreo	17
5.	RESULTADOS	18
5.1.	Sistema Soncor	18
5.1.1.	Laguna Chaxa	18
5.1.2.	Laguna Barros Negros	21
5.1.3.	Laguna Puilar	24
5.1.4.	Desborde Sur (Zona de inundación)	26
5.2.	Sistema Peine	28
5.2.1.	Laguna Salada	28
5.2.2.	Laguna Saladita	30
5.2.3.	Laguna Interna	32
6.	CONCLUSIONES	34
7.	REFERENCIAS	35

Tablas

Tabla 1-1. Resumen de superficies lagunares abril 2017	1
Tabla 4-1. Total de puntos de control en terreno para la delimitación de las superficies.	6
Tabla 4-2. Coordenadas de ubicación de los puntos de control ejecutados en el año 2017. (WGS84 19S) .	7
Tabla 4-3. Fecha de captura y características de las imágenes satelitales.	10
Tabla 4-4. Parámetros radiométricos del suelo.....	13
Tabla 4-5: Coordenadas de límites de control	16
Tabla 5-1. Superficies de cuerpos lacustres medidas en abril 2017 mediante análisis de imágenes satelitales - Sistema Soncor.....	18
Tabla 5-2. Superficies de cuerpos lacustres medidas en abril 2017 mediante análisis de imágenes satelitales - Sistema Peine.....	28

Figuras

Figura 4-1. Lagunas de los sistemas Soncor y Peine	5
Figura 4-2. Esquema de la metodología empleada en el cálculo de superficie de sistemas lacustres.	9
Figura 4-3. Imagen multiespectral de referencia e imagen fusionada.....	11
Figura 4-4. Correlación entre NDr y NDirc para Transformación TSAVI	13
Figura 4-5. Índice de agua de diferencia normalizada modificado (MNDWI)	14
Figura 5-1. Fotografías de laguna Chaxa.....	19
Figura 5-2. Mapa de ubicación puntos de control de terreno Laguna Chaxa, campaña 2017	20
Figura 5-3. Fotografías de puntos de control de terreno. Laguna Barros Negros	22
Figura 5-4. Mapa de ubicación puntos de control de terreno Laguna Barros Negros, campaña 2017	23
Figura 5-5. Fotografías de puntos de control de terreno. Laguna Puilar	24
Figura 5-6. Mapa de ubicación puntos de control de terreno Laguna Puilar, campaña 2017	25
Figura 5-7. Fotografías de puntos de control de terreno. Laguna Desborde Sur	26
Figura 5-8. Mapa de ubicación puntos de control de terreno Laguna Desborde Sur, campaña 2017	27
Figura 5-9. Contorno de Superficie Laguna Salada, campaña 2017	29
Figura 5-10. Contorno de superficie Laguna Saladita, campaña 2017	31
Figura 5-11. Fotografías de puntos de control de terreno Laguna Interna.	32
Figura 5-12. Mapa de ubicación puntos de control de terreno Laguna Interna, campaña 2017	33

Anexos

Anexo 1. Responsables y participantes Seguimiento Ambiental – Campaña abril 2017
Anexo 2. Fotografías puntos de control de terreno – Campaña abril 2017
Anexo 3. Registro de actividades en sector Peine

1. RESUMEN

El presente informe corresponde al Plan de Seguimiento Ambiental de los cuerpos lacustres de los sistemas Soncor y Peine, ubicados en el Borde Este del Salar de Atacama, Región de Antofagasta, de acuerdo a la RCA 226/2006 y de acuerdo a la metodología indicada en el considerando 6° de la Resolución Exenta N° 244/2010 de la Comisión Regional de Medio Ambiente, Región de Antofagasta.

La medición del tamaño de las lagunas se realiza con el uso de imágenes satelitales de alta resolución fusionadas, con el apoyo de índices alternativos (IHS, TSAVI, NDWI), y mediciones de terreno necesarias para la definición de límites difusos que representan una complejidad en la interpretación de la imagen satelital de acuerdo a la metodología indicada en la Resolución Exenta N°244/2010.

Cabe destacar que la superficie lagunar que se mide contempla los límites definidos por la Corporación Nacional Forestal (CONAF) en su informe de monitoreo efectuado en el marco del convenio SQM-CONAF “Hábitat y Poblaciones de Avifauna del Salar de Atacama”, además de otros límites presentados el año 2009 y 2010 y que han sido validado por parte de una mesa de trabajo conformado por distintas autoridades. En el cuadro resumen (Tabla 1-1) a continuación se presenta las superficies medidas del espejo de agua en los Sistemas Soncor y Peine.

En el presente reporte, no se realizó control de terreno para las lagunas Salada y Saladita debido a impedimentos externos a las labores de monitoreo (acceso denegado al sector por parte de la comunidad de Peine¹). La superficie presentada para ambas lagunas corresponde sólo al resultado del análisis a la imagen satelital.

Tabla 1-1. Resumen de superficies lagunares abril 2017

Sistema	Cuerpo de Agua	Superficie del espejo de agua (m²)
Soncor	Chaxa	293.310
	Barros Negros	1.289.158
	Puilar	69.434
	Desborde Sur (de Barros Negros)	312.329
Peine	Salada	200.985
	Saladita	99.410
	Interna	405.302

Fuente: Elaboración propia.

¹ Solamente se pudo acceder 1 día a terreno, en donde se realizó el control de terreno para la laguna Interna.

2. INTRODUCCIÓN

El presente informe expone los resultados obtenidos en abril 2017 de las superficies de cuerpo lacustres del Borde Este del Salar de Atacama, utilizando las especificaciones metodológicas señaladas en el considerando 6° de la Resolución Exenta N°244/2010 de la COREMA Región de Antofagasta.

La medición de las superficies lacustres se realiza como parte de las actividades comprometidas en el Plan de Seguimiento Ambiental (PSA) del EIA “Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama”, aprobado ambientalmente por la Resolución exenta N°226/2006 de la Comisión Regional del Medio Ambiente (COREMA) Región de Antofagasta. Conforme a lo indicado, a partir del análisis de imágenes satelitales de alta resolución se establece la superficie lacustre de las principales lagunas de los sistemas Soncor (Puilar, Chaxa y Barros Negros) y el sistema Peine (Salada, Saladita e Interna) (Considerando 10.2.2 y 10.2.4 de la RCA N°226/2006).

Posteriormente, mediante la Resolución exenta N° 244/2010 de la COREMA Región de Antofagasta, se redefine la metodología para la medición de las superficies lacustres, incorporando mejoras en el procesamiento de la imagen satelital, el uso de diversos índices espectrales para la delimitación de contornos y puntos de terreno como control y corrección de límites, la cual fue implementada a partir de la temporada 2010. Asimismo, la medición considera los límites definidos por la CONAF para cada uno de los sistemas, los cuales se detalla en la Tabla 4-5.

La labor ha sido realizada por la empresa de consultoría ambiental Geobiota, por solicitud de SQM Salar S.A. En el Anexo 1 se identifican los profesionales que participan en esta labor.

3. OBJETIVOS

El objetivo del presente informe es mostrar los resultados obtenidos en las mediciones de las superficies de los cuerpos lagunares para el año 2017 de los sistemas Soncor y Peine, de acuerdo al Plan de Seguimiento Ambiental (PSA) del Proyecto “Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama” de SQM Salar S.A.

La medición contempla un análisis de las imágenes satelitales y la verificación en terreno de los límites difusos detectados en la imagen para determinar la superficie de las lagunas de los sistemas Soncor y Peine.

4. MATERIAL Y MÉTODO

4.1. Descripción del área de estudio

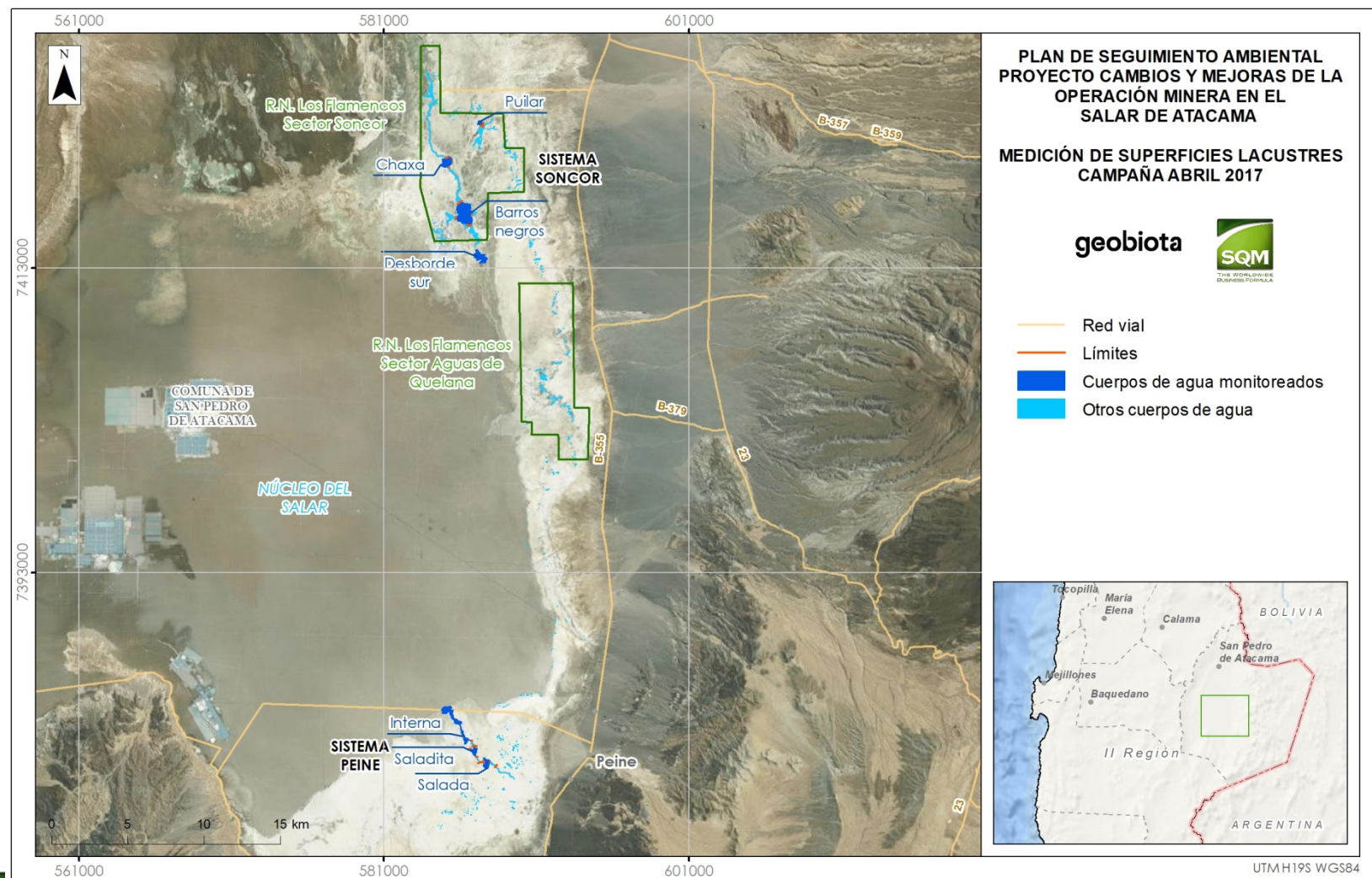
El área de estudio corresponde a los sistemas lagunares Soncor y Peine, identificados en la RCA 226/2006.

El sistema lacustre Soncor forma parte de la Reserva Nacional Los Flamencos, y está conformado por las lagunas Barros Negros, Chaxa y Puilar y el Canal Burro Muerto. Al sur de la laguna Barros Negros se ubica una zona de inundación de gran extensión denominada “Desborde Sur”, la cual también se ha considerado dentro de los cuerpos a medir, pese a que no corresponde a una unidad regular permanente). La laguna de mayor tamaño de este sistema es Barros Negros, la que se conecta hacia el norte con la laguna Chaxa mediante el Canal Burro Muerto. La laguna Puilar se ubica al noreste de las lagunas mencionadas anteriormente.

El sistema lacustre Peine está formado por tres (3) lagunas distribuidas de sureste a noroeste y conectadas entre sí por un solo canal, denominadas Salada, Saladita e Interna (en dicho orden desde sureste a noroeste).

La ubicación de las lagunas se presenta en la Figura 4-1.

Figura 4-1. Lagunas de los sistemas Soncor y Peine



Fuente: Elaboración propia.

4.2. Ubicación de los puntos de control

Los puntos de control fueron establecidos en el informe de la campaña 2010, de acuerdo a lo definido por la Resolución exenta N°244/2010 que aprueba metodológicamente el presente monitoreo. Como se describe en la resolución señalada, para los posteriores monitoreos se debe mantener el número y ubicación aproximada, variando de un año a otro en función de la presencia de los bordes que ofrecen dificultades en la delimitación, sin que esto signifique una disminución del número de puntos de control.

La Tabla 4-1 presenta los puntos ejecutados en las campañas 2010 y 2017 en cada laguna. Posteriormente, en la Tabla 4-2 se indica la ubicación de cada punto de control ejecutado con sus respectivas coordenadas UTM, Datum WGS84 y huso 19. La ubicación de los puntos de control en cada laguna se observa en la Figura 5-2, Figura 5-4, Figura 5-6, Figura 5-8, Figura 5-12.

Tabla 4-1. Total de puntos de control en terreno para la delimitación de las superficies.

Sistema lacustre	Laguna	2010	2017
Soncor	Barros negros	22	28
	Chaxa	9	9
	Puilar	16	17
	Desborde sur	-	27
Peine	Salada	4	0*
	Saladita	16	0*
	Interna	-	71
	Total	67	152

* No se generaron descripciones de terreno en dichas superficies dado que no se pudo acceder a la zona debido a impedimentos externos (Acceso denegado por parte de la comunidad).

Fuente: Elaboración propia.

En el presente monitoreo no se pudo ejecutar puntos de control de terreno para las lagunas Salada y Saladita dado que la comunidad de Peine no permitió el ingreso al sector en la fecha que se programó realizar dichas actividades. El Anexo 3 muestra el registro de actividad de seguimiento asociado.

Tabla 4-2. Coordenadas de ubicación de los puntos de control ejecutados en el año 2017. (WGS84 19S)

Sistema lacustre	Laguna	ID	Este	Norte	Sistema lacustre	Laguna	ID	Este	Norte	Sistema lacustre	Laguna	ID	Este	Norte
Soncor	Barros negros	BN-01	586.336	7.417.174	Soncor	Barros negros	BN-27	585.219	7.415.982	Soncor	Puilar	PU-16	587.315	7.422.642
		BN-02	586.437	7.417.181			BN-28	585.198	7.415.881			PU-17	587.385	7.422.629
		BN-03	586.491	7.417.242		Chaxa	CH-01	585.204	7.419.629		Desborde sur	DS-01	587.150	7.414.102
		BN-04	586.671	7.417.107			CH-02	585.204	7.419.669			DS-02	587.233	7.414.032
		BN-05	586.695	7.416.890			CH-03	585.186	7.419.682			DS-03	587.304	7.413.966
		BN-06	586.706	7.416.733			CH-04	585.402	7.419.802			DS-04	587.346	7.413.882
		BN-07	586.851	7.416.674			CH-05	585.395	7.419.865			DS-05	587.435	7.413.834
		BN-08	587.109	7.416.636			CH-06	585.384	7.419.967			DS-06	587.577	7.413.832
		BN-09	586.902	7.416.470			CH-07	585.402	7.420.120			DS-07	587.647	7.413.706
		BN-10	586.737	7.416.597			CH-08	585.385	7.420.142			DS-08	587.704	7.413.673
		BN-11	586.696	7.416.504			CH-09	585.330	7.420.220			DS-09	587.769	7.413.568
		BN-12	586.668	7.416.521		Puilar	PU-01	587.503	7.422.332			DS-10	587.688	7.413.508
		BN-13	586.632	7.416.500			PU-02	587.523	7.422.279			DS-11	587.608	7.413.508
		BN-14	586.697	7.416.359			PU-03	587.488	7.422.281			DS-12	587.674	7.413.431
		BN-15	586.452	7.415.585			PU-04	587.349	7.422.327			DS-13	587.608	7.413.345
		BN-16	586.128	7.415.939			PU-05	587.331	7.422.356			DS-14	587.509	7.413.382
		BN-17	586.214	7.416.085			PU-06	587.297	7.422.381			DS-15	587.435	7.413.334
		BN-18	586.142	7.416.071			PU-07	587.265	7.422.412			DS-16	587.326	7.413.302
		BN-19	585.907	7.416.076			PU-08	587.245	7.422.414			DS-17	587.383	7.413.381
		BN-20	585.862	7.416.116			PU-09	587.213	7.422.431			DS-18	587.429	7.413.452
		BN-21	585.899	7.416.154			PU-10	587.182	7.422.390			DS-19	587.317	7.413.555
		BN-22	585.795	7.416.205			PU-11	587.152	7.422.421			DS-20	587.208	7.413.536
		BN-23	585.535	7.416.285			PU-12	587.199	7.422.486			DS-21	587.139	7.413.596
		BN-24	585.487	7.416.213			PU-13	587.188	7.422.541			DS-22	586.973	7.413.657
		BN-25	585.332	7.416.104			PU-14	587.194	7.422.569			DS-23	586.949	7.413.741
		BN-26	585.295	7.416.117			PU-15	587.235	7.422.602			DS-24	586.965	7.413.927

Tabla 4-2. Coordenadas de ubicación de los puntos de control ejecutados en el año 2017. (WGS84 19S)

Sistema lacustre	Laguna	ID	Este	Norte	Sistema lacustre	Laguna	ID	Este	Norte	Sistema lacustre	Laguna	ID	Este	Norte
Soncor	Desborde sur	DS-25	587.036	7.413.922	Peine	Interna	IN-23	585.648	7.383.197	Peine	Interna	IN-48	585.327	7.384.247
		DS-26	587.054	7.413.956			IN-24	585.671	7.383.328			IN-49	585.390	7.384.234
		DS-27	587.094	7.414.050			IN-25	585.578	7.383.363			IN-50	585.460	7.384.149
Peine	Interna	IN-01	586.635	7.381.993	Peine	Interna	IN-26	585.538	7.383.355	Peine	Interna	IN-51	585.388	7.384.058
		IN-02	586.525	7.382.024			IN-27	585.490	7.383.420			IN-52	585.552	7.383.954
		IN-03	586.427	7.381.995			IN-28	585.487	7.383.456			IN-53	585.500	7.383.794
		IN-04	586.415	7.381.971			IN-29	585.450	7.383.519			IN-54	585.515	7.383.710
		IN-05	586.495	7.381.917			IN-30	585.413	7.383.638			IN-55	585.572	7.383.648
		IN-06	586.414	7.381.857			IN-31	585.324	7.383.808			IN-56	585.567	7.383.613
		IN-07	586.401	7.381.814			IN-32	585.343	7.383.906			IN-57	585.582	7.383.465
		IN-08	586.343	7.381.772			IN-33	585.197	7.383.878			IN-58	585.642	7.383.411
		IN-09	586.303	7.381.783			IN-34	585.177	7.383.801			IN-59	585.716	7.383.382
		IN-10	586.313	7.381.870			IN-35	585.085	7.383.787			IN-60	585.832	7.383.321
		IN-11	586.319	7.381.971			IN-36	585.045	7.383.782			IN-61	585.916	7.383.258
		IN-12	586.246	7.382.036			IN-37	584.975	7.383.771			IN-62	586.029	7.383.227
		IN-13	586.232	7.382.057			IN-38	584.901	7.383.780			IN-63	586.073	7.383.200
		IN-14	586.259	7.382.136			IN-39	584.866	7.383.794			IN-64	586.009	7.383.081
		IN-15	586.212	7.382.237			IN-40	584.855	7.383.825			IN-65	586.023	7.382.997
		IN-16	586.184	7.382.328			IN-41	584.849	7.383.904			IN-66	586.075	7.382.747
		IN-17	586.105	7.382.623			IN-42	584.799	7.383.971			IN-67	586.204	7.382.460
		IN-18	586.011	7.382.995			IN-43	584.813	7.384.045			IN-68	586.239	7.382.360
		IN-19	585.923	7.383.063			IN-44	584.882	7.384.147			IN-69	586.320	7.382.183
		IN-20	585.875	7.383.110			IN-45	584.948	7.384.168			IN-70	586.495	7.382.095
		IN-21	585.817	7.383.103			IN-46	585.119	7.384.178			IN-71	586.532	7.382.039
		IN-22	585.738	7.383.095			IN-47	585.218	7.384.197					

Fuente: Elaboración propia.

4.3. Parámetros para caracterizar el estado y evolución de las variables ambientales

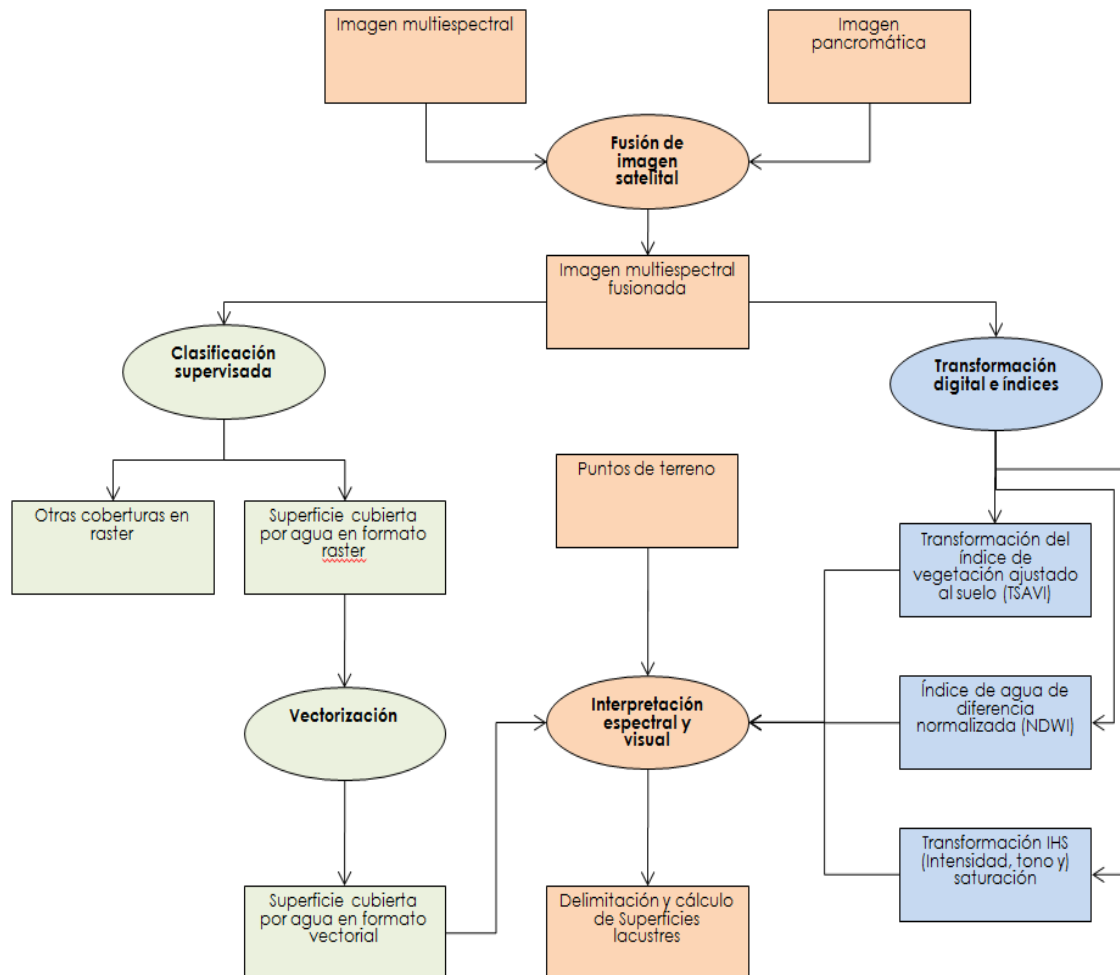
Como parámetro se utiliza el contorno de las superficies, el que posteriormente se utiliza para realizar el cálculo de la superficie de cada laguna.

4.4. Metodología de medición y análisis

La medición de las superficies lacustres se realizó según la metodología establecida en la Resolución exenta N° 244/2010, a partir de imágenes de alta resolución, aplicándose índices y transformaciones espectrales, posterior a la fusión de la imagen pancromática con la imagen multispectral.

A continuación, en la Figura 4-2 se muestra un diagrama general de la metodología utilizada.

Figura 4-2. Esquema de la metodología empleada en el cálculo de superficie de sistemas lacustres.



Fuente: Elaboración propia.

4.4.1. Análisis de imágenes satelitales

La primera etapa contempló la obtención y recopilación de las imágenes satelitales de alta resolución para el área de interés. Durante el año 2017, se ha utilizado imágenes captadas por el satélite Geoeye-I. El uso de imágenes de este satélite se debe a la disponibilidad del proveedor para la fecha en que se obtuvo la imagen. Esta imagen es de modalidad Bundle, la que incluye una imagen pancromática de 1 banda y una imagen multiespectral de 4 bandas. El detalle de las imágenes satelitales utilizadas se presenta en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3. Fecha de captura y características de las imágenes satelitales.

Temporada de estudio	Fecha de captura	Satélite	Resolución espacial
2017	1 de abril	Geoeye-I	Multiespectral 2,0 m; Pancromático 0,5 m

Fuente: Elaboración propia.

La imagen satelital se utilizó con el sistema de coordenadas UTM 19 sur y Datum WGS 84. Luego, a través del programa de software cartográfico (ArcGIS) se procedió a realizar una serie de modificaciones para facilitar la detección de los cuerpos de agua en estudio, los cuales se describen a continuación.

4.4.1.1. Fusión de imagen

Para mejorar la resolución espacial de la imagen multiespectral obtenida desde el Satélite Geoeye-I, y con el fin de obtener un mayor detalle de información, se procedió a fusionarla con la imagen pancromática mediante el método modificado de fusión de imágenes satelitales denominado IHS (intensidad, tono y saturación en sus siglas en inglés) (Siddiqui, 2003). Esto permite que la imagen multiespectral alcance la resolución espacial de la imagen pancromática (Figura 4-3).

Dado que la imagen pancromática no siempre se correlaciona de buena forma con la componente intensidad, se incluye una serie de modificaciones al proceso, debido a que la imagen fusionada con el método tradicional no se asemeja a la original (Siddiqui, 2003). Para corregir este problema se superpone espectralmente cada banda multiespectral con la imagen pancromática, modificando la intensidad de esta última a partir de una ponderación, la cual se realiza en base a las longitudes de onda sobre cada banda (Siddiqui, 2003).

Figura 4-3. Imagen multiespectral de referencia e imagen fusionada

Imagen pancromática (0,5 m)

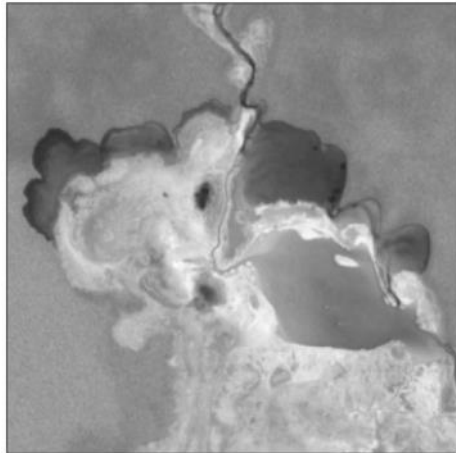


Imagen multiespectral (2,0 m)

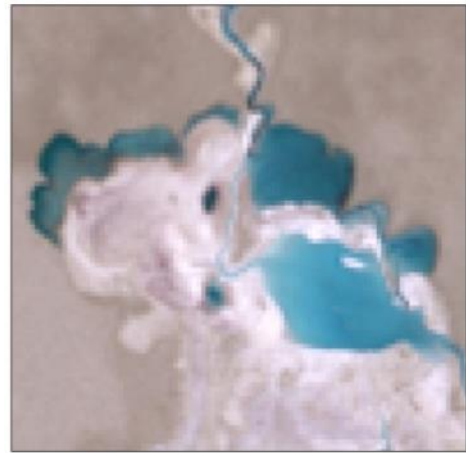
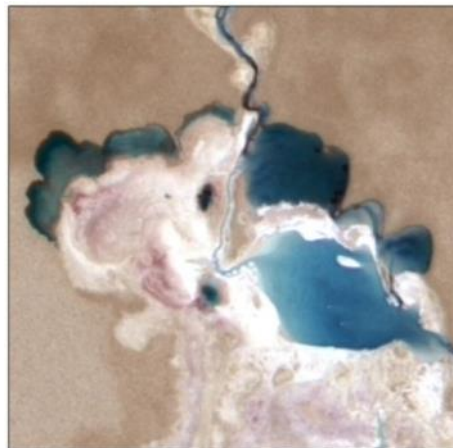


Imagen multiespectral fusionada (0,5 m)



Fuente: Elaboración propia.

4.4.1.2. Transformaciones multiespectrales

Con el fin de apoyar la fase de corrección y la delimitación de las superficies lacustres, se realizaron las siguientes transformaciones digitales: Índice de agua de diferencia normalizada (MNDWI), índice de vegetación ajustado al suelo (TSAVI) y la transformación IHS, los que se presentan en detalle a continuación (Figura 4-5).

a. Modificación del índice de agua de diferencia normalizada (MNDWI)

El índice MNDWI corresponde a un índice para la discriminación de aguas abiertas, cuya elaboración fue realizada para sensores de alta resolución espectral, especialmente para sensores que capturan información entre 0,76-0,90 micras (infrarrojo cercano) y las 1,55-1,75 micras (infrarrojo medio). Dada la ausencia del infrarrojo medio en la mayoría de los sensores de alta resolución espacial como Quickbird-II, Worldview-II y Geoeye-I, se realizó una modificación a este índice McFeeters (1996), calculándose una diferencia normalizada entre la banda verde (NDv) y el infrarrojo cercano (NDirc), considerando la respuesta espectral del agua en dichas bandas, como se observa en la siguiente ecuación:

$$MNDWI = \frac{ND_v - ND_{irc}}{ND_v + ND_{irc}}$$

Donde

ND_v : Niveles Digitales verde

ND_{irc} : Niveles Digitales infrarrojo cercano

En base a este índice, mediante un proceso iterativo, se logra determinar el valor que diferencia un pixel entre agua (superficie lacustre o vegetación con presencia de agua contigua a éstos con valores mayores o iguales a 0) y ausencia de agua (valores inferiores a 0).

b. Transformación del índice de vegetación ajustado al suelo (TSAVI)

Éste pertenece a una familia de curvas que modifican el índice de vegetación normalizado NDVI, cuyo inconveniente principal es su sensibilidad a las propiedades ópticas del suelo. Las modificaciones del TSAVI se contextualizan en la introducción de parámetros radiométricos del suelo (Factores a y b en la ecuación), minimizando la sensibilidad a estos efectos (Gilbert *et al.*, 1997), como se puede observar en la siguiente ecuación:

$$TSAVI = \frac{a (ND_{irc} - a ND_r - b)}{ND_r + a ND_{irc} - ab + 0,08(1 + a^2)}$$

Donde

ND_r : Niveles Digitales rojo

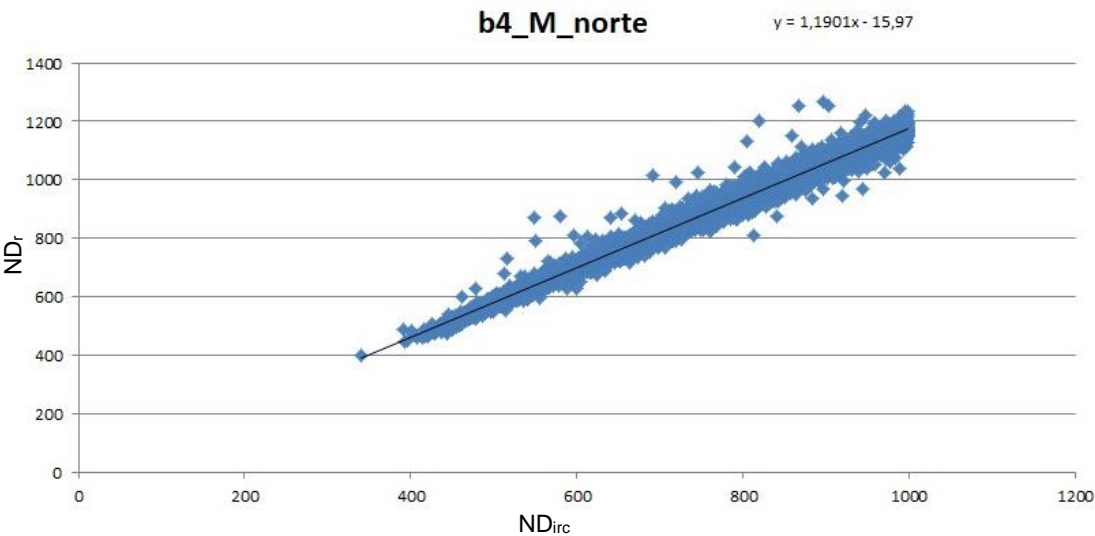
ND_{irc} : Niveles Digitales infrarrojo cercano

a : Pendiente de la curva de suelos

b : Intercepto de la curva de suelos

Para determinar los valores a y b mencionados, se grafican los valores asociados a las bandas de rojo (ND_r) e infrarrojo (ND_{irc}) para puntos conocidos que corresponden a suelos, y se determina en base a la línea de tendencia asociada los valores a y b de dicha curva.

Figura 4-4. Correlación entre NDr y NDirc para Transformación TSAVI



Fuente: Elaboración propia

Debido a los antecedentes planteados, para este monitoreo no se utilizó como herramienta de apoyo el NDVI (Índice de diferencia normalizada de vegetación).

Para el presente informe, los índices a y b utilizados corresponden a los presentados en la Tabla 4-4.

Tabla 4-4. Parámetros radiométricos del suelo

Sistema	Factor a	Factor b
Soncor	1,1901	15,9700
Peine	1,1417	14,7170

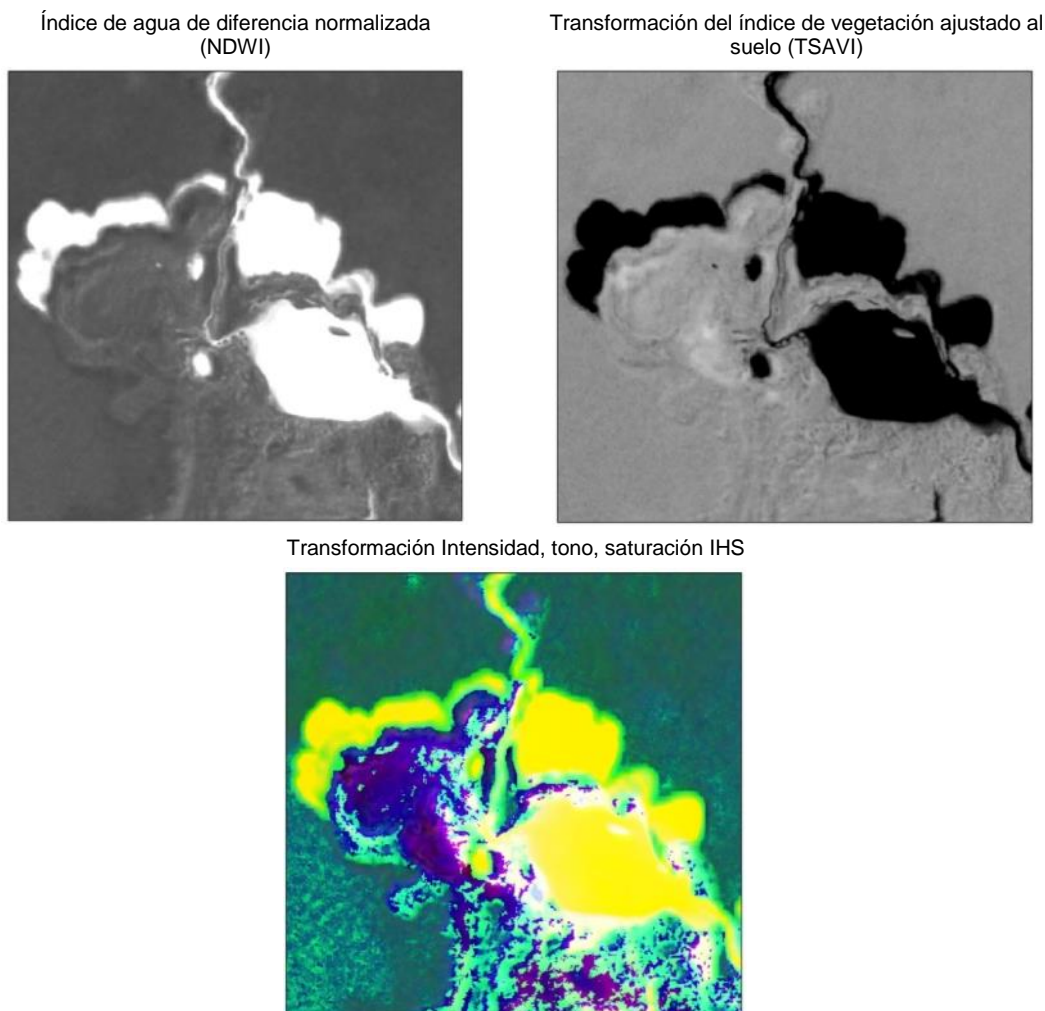
Fuente: Elaboración propia

Esta transformación se utiliza como complemento del método expuesto anteriormente en los sectores en donde no se observa un borde definido de los cuerpos de agua, dado que para algunas configuraciones presenta un mejor contraste entre suelo y agua. Esto deriva en que no se define un valor específico para distinguir entre suelo y agua, si no que se utilizó como herramienta visual para la determinación de los bordes difusos.

c. Transformación IHS

Como se mencionó en el método de fusión, básicamente transforma los valores de una composición de RGB (Bandas verde, roja e infrarroja para el caso de este estudio) en una forma alternativa de representar el color basado en sus propiedades. Se trata de la transformación intensidad, tono y saturación (IHS; del inglés *intensity, hue and saturation*) (Figura 4-5). Su uso para la discriminación de agua, se basa en su potencialidad para la discriminación de algunos rasgos de carácter cromático (Chuvienco, 2002). Al igual que el método TSAVI, esta transformación fue utilizada para complementar al método MNDWI en sectores donde el borde es difícil de determinar y en donde esta transformación presenta una mayor diferencia entre suelo y agua.



Figura 4-5. Índice de agua de diferencia normalizada modificado (MNDWI)

Fuente: Elaboración propia.

4.4.2. Digitalización de contornos

La identificación de los contornos en las coberturas se realizó mediante clasificación supervisada de imágenes satelitales fusionadas. Dada la resolución espacial y espectral de estas imágenes es posible realizar clasificaciones detalladas y de forma efectiva.

La clasificación supervisada consiste en una serie de procedimientos diseñados para categorizar automáticamente todos los píxeles de una imagen en distintas clases de cobertura de suelo. En términos generales, estos procesos corresponden a la creación de áreas de entrenamiento y la clasificación propiamente tal, a modo de ir identificando parámetros bajo los cuales la clasificación es efectiva.

La creación de áreas de entrenamiento con el fin de identificar superficies lacustres, consistió en la identificación y selección de píxeles representativos tanto para los cuerpos de agua como para las coberturas presentes en la superficie perimetral entorno a cada laguna. Para aquello se requirió la identificación de patrones de cobertura (sectores de suelo y agua fácilmente reconocibles) a través de un software de análisis de imágenes (ArcGIS).

Con estos sectores se realizó la clasificación propiamente tal utilizando el método de máxima similitud, con el cual, los píxeles de la imagen fueron clasificados de acuerdo a las categorías asignadas a los Niveles Digitales (ND) de las zonas de muestreo. Esto se realizó mediante iteraciones a fin de ajustar estadísticamente los valores digitales al interior de cada categoría. En base a esto, se obtuvo el criterio para diferenciar agua de suelo según el índice MNDWI, así como también los parámetros para las 3 transformaciones multiespectrales descritas previamente

Una vez efectuado este proceso, se analizó y clasificó cada una de las zonas donde se encuentran las lagunas mediante el índice MNDWI.

Producto del análisis de la imagen satelital se obtuvo información digital en formato raster (píxeles de resolución 0,5 x 0,5 m de superficies cubiertas con agua y de otras coberturas. Posterior a esto se seleccionaron las coberturas correspondientes a cuerpos de agua, y se vectorizaron sus contornos identificando finalmente aquellos cuerpos lacustres de los sistemas en estudio. Estos contornos se ajustaron posteriormente utilizando las imágenes asociadas a las transformaciones TSAVI e IHS en aquellos sectores donde la imagen no presentaba un borde definido.

4.4.3. Control de terreno

La Resolución Exenta N°244/2010 contempla anualmente toma de datos en terreno, con el propósito de obtener coordenadas de puntos de control, demarcar y obtener información necesaria para la caracterización de las superficies lacustres. Los sectores prospectados fueron aquellos de difícil delimitación tanto en terreno como en la imagen satelital, dado que son zonas cuyos límites son difusos.

En terreno se realizó un registro fotográfico de cada punto de control, respaldando la identificación de agua libre y suelo. El respaldo fotográfico se presenta en el Anexo 2 del presente informe.

La aplicación del método propuesto en la Resolución Exenta, se inició desde el año 2010. Esto implicó que a partir de ese año se formalizó la utilización de puntos de apoyo para la delimitación, los cuales se definieron a partir de puntos visitados de la campaña anterior (2009), en áreas de la laguna cuyo contorno fuese principalmente difuso.

4.4.4. Delimitación de los contornos de las superficies lacustres

Una vez realizado el control de terreno, en un sistema de información geográfico (SIG) se procedió a la revisión y delimitación de los contornos de las lagunas.

Los procedimientos de delimitación se efectuaron mediante una superposición digital, que incluyó los contornos provenientes de la clasificación supervisada, puntos de control de terreno y las transformaciones espectrales extraídas de la imagen multiespectral fusionada. A través de éstas, se verificó el calce uno a uno mediante identificación visual y rectificación vectorial del contorno de las superficies lacustres en los casos que fuese necesario.

Para efectos de la medición de las superficies, la delimitación consideró la definición de límites de cada laguna según criterios de la Corporación Nacional Forestal (CONAF), expuestos en los informes de monitoreo efectuados en el marco del convenio SQM-CONAF "Hábitat y Poblaciones de Avifauna del Salar de Atacama" y por límites presentados en informes previos (Informe año 2009² y año 2010³ y que han sido aprobados mediante una mesa de trabajo compuesta por el Titular y por distintas autoridades

² Ver Capítulo 2.3 de Informe año 2009

³ Ver Capítulo 2 del informe año 2010

tales como CONAMA, CONAF, DGA y SAG y que se han mantenido hasta la fecha. Las coordenadas de los límites se presentan en la siguiente tabla

Tabla 4-5: Coordenadas de límites de control

Sector (Sistema)	Laguna	Vértice	WGS84 19S		Origen
			Este	Norte	
Soncor	Chaxa	V1.1	585074	7420189	CONAF
		V1.2	585116	7420185	
		V1.3	585220	7420296	
		V2.1	585203	7419607	CONAF
		V2.2	585302	7419607	
	Barros Negros	V1.1	585821	7417181	CONAF
		V1.2	586146	7417405	
		V2.1	586497	7415766	CONAF
		V2.2	586740	7415795	
		V3.1	586784	7416689	Delimitación zona de Inundación (Creada el año 2010)
		V3.2	586750	7416465	
		V4.1	585751	7416340	CONAF y reemplazada por delimitación zona de inundación (modificada el año 2010)
		V42	585663	7416166	
		V5.1	586438	7415838	Delimitación zona de Inundación (Creada el año 2010)
		V5.2	586535	7415801	
	Puilar	V1.1	587523	7422529	CONAF
		V1.2	587523	7422331	
		V2.1	587411	7422279	Delimitación creada año 2010
		V2.2	587534	7422278	
		V3.1	587331	7422342	Delimitación creada año 2010
		V3.2	587369	7422340	
Peine	Salada	V1.1	587155	7380528	CONAF
		V1.2	587494	7380642	
		V2.1	588291	7380247	CONAF
		V2.2	588428	7380416	
		V3.1	587959	7380591	Delimitación creada el año 2010 para identificar canal de recarga
		V3.2	587970	7380610	
		V41	587576	7380512	Delimitación creada el año 2010 para identificar canal de descarga
		V4.2	587576	7380551	
	Saladita	V1.1	586795	7381626	CONAF
		V1.2	587096	7381620	

Tabla 4-5: Coordenadas de límites de control

Sector (Sistema)	Laguna	Vértice	WGS84 19S		Origen
			Este	Norte	
		V2.1	586610	7381448	CONAF
		V2.2	586720	7381473	
		V3.1	587015	7380917	CONAF
		V3.2	587167	7380918	
	Interna	V1.1	586791	7381997	Delimitación creada el año 2009 debido al aumento de la superficie
		V1.2	586785	7381938	

Fuente: Elaboración propia

4.5. Materiales y equipos utilizados

Para el registro de la información se utilizaron receptores GPS marca Trimble® modelo Nomad® 900G, de especial uso para aplicaciones SIG. Además se utilizó una cámara fotográfica para registrar las condiciones de la lámina de agua en cada punto de control.

Respecto a la imagen satelital Geoeye-I utilizada para el monitoreo, la fecha de captura corresponde al 1 de abril de 2017.

4.6. Fechas de muestreo

Los puntos de control de terreno han sido ejecutados entre el 04 y el 14 de abril de 2017. Tal cómo se indicó anteriormente, la fecha de captura de la imagen satelital corresponde al 1 de abril de 2017.

5. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados de las mediciones de las superficies lagunares de los sistemas Soncor y Peine realizadas en la campaña de abril de 2017.

5.1. Sistema Soncor

En el siguiente acápite se presentan las superficies de las lagunas que componen el sistema Soncor y que corresponden a las lagunas Chaxa, Barros Negros y Puilar. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 5-1.

Tal como se mencionó en la sección 4.1, se presenta, dentro del Sistema Soncor, la superficie del Desborde Sur, ubicada al sur de laguna Barros Negros, la cual se incorporó a las mediciones de superficies lacustres como parte del presente monitoreo, a partir del año 2016, pese a no corresponder estrictamente a una laguna.

Tabla 5-1. Superficies de cuerpos lacustres medidas en abril 2017 mediante análisis de imágenes satelitales - Sistema Soncor.

LAGUNA	SUPERFICIES (m ²)
CHAXA	
Cuerpo principal	293.310
Total Chaxa	293.310
BARROS NEGROS	
Cuerpo principal	1.082.109
Área de inundación I	125.280
Área de inundación II	54.481
Área de inundación III	27.288
Total Barros Negros	1.289.158
PUILAR	
Cuerpo principal	69.434
Total Puilar	69.434
DESBORDE SUR (Zona de Inundación)	
Cuerpo principal	312.329
Total Desborde Sur	312.329

Fuente: Elaboración propia

5.1.1. Laguna Chaxa

Laguna Chaxa se encuentra constituida por un cuerpo principal cuyo contorno se encuentra bien definido en la mayor parte de la superficie de la laguna debido a una costra salina blanquecina. No obstante, al lado este (Figura 5-1, Punto CH-06) y al oeste del cauce de descarga ubicado en el sector sur, se presenta un contorno difuso y de compleja delimitación, producto de un sedimento barroso oscuro en condiciones de anegamiento, en donde se observa en algunos casos una lámina de agua de pocos milímetros de profundidad (Figura 5-1. Punto CH-02).

Figura 5-1. Fotografías de laguna Chaxa.

Punto CH-02
UTM (WGS84 H19) E 585.204 - N 7.419.669
Foto tomada el 06-04-2017



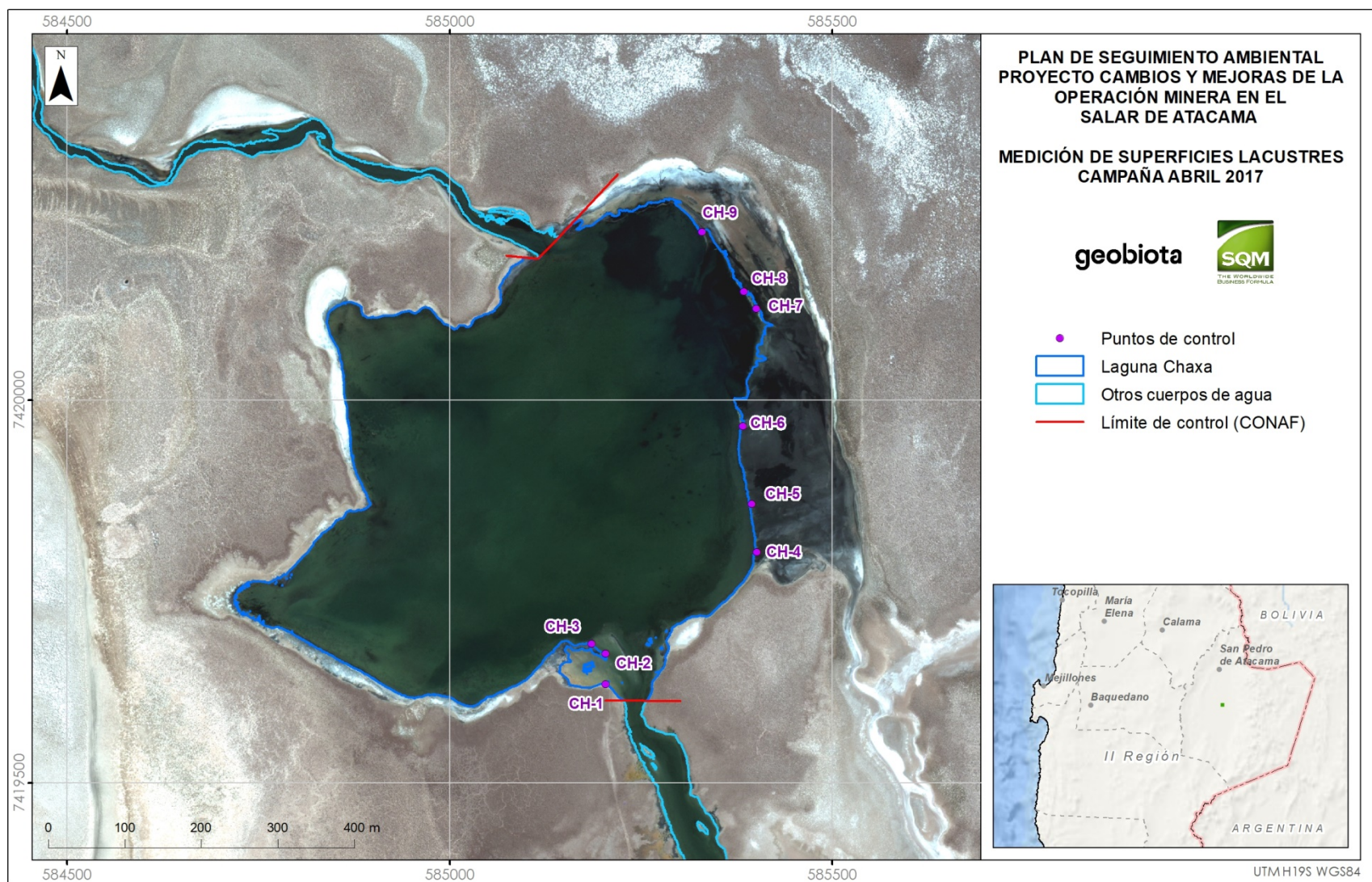
Punto CH-06
UTM (WGS84 H19) E 585.384 - N 7.419.967
Foto tomada el 06-04-2017



Fuente: Elaboración propia.

A continuación, en la Figura 5-2, se muestran los puntos de control de terreno durante la campaña de abril 2017 para laguna Chaxa y además se presentan los dos límites CONAF considerados para restringir la superficie.

Figura 5-2. Mapa de ubicación puntos de control de terreno Laguna Chaxa, campaña 2017



5.1.2. Laguna Barros Negros

Laguna Barros Negros es el cuerpo de agua más grande del sistema Soncor. Está constituida por un cuerpo principal y tres (3) áreas de inundación sin contar con el cuerpo “Desborde Sur”, la cual es de un área considerablemente mayor a las 3 previas. El perímetro del cuerpo principal es bien definido con algunos sectores morfológicamente irregulares en el sector sur y noreste, lugares donde los cuerpos de agua menores se conectan al cuerpo principal (Figura 5-3, Punto BN-16).

El área de inundación I, denominada “Cola de pez” y ubicada al suroeste de la laguna, presenta para este año un contorno definido en gran parte de su perímetro, excepto por determinados sectores como los que se muestran en la Figura 5-3, Punto BN-24. El área de inundación I tiene la mayor superficie de las tres presentes en la laguna.

El área de inundación II, se ubica en el borde este de la laguna y se caracteriza por cuerpos de agua con una muy baja profundidad (< 5 cm) (Figura 5-3 Punto BN-08).

El área de inundación III, se ubica en el lado sur del cuerpo lacustre. Corresponde a un cuerpo menor de agua, con escasa profundidad (10 cm). (Figura 5-3 Punto BN-15).

Posteriormente, en la Figura 5-4, se muestran los puntos de control de terreno durante la campaña de abril 2017 para laguna Barros Negros y además se presentan los cinco límites de control considerados para restringir la superficie.

Figura 5-3. Fotografías de puntos de control de terreno. Laguna Barros Negros

Punto BN-16
UTM (WGS84 H19) E 586.128 - N 7.415.939
Foto tomada el 08-04-2017



Punto BN-24
UTM (WGS84 H19) E 585.487 - N 7.416.213
Foto tomada el 08-04-2017



Punto BN-08
UTM (WGS84 H19) E 587.109 - N 7.416.636
Foto tomada el 08-04-2017

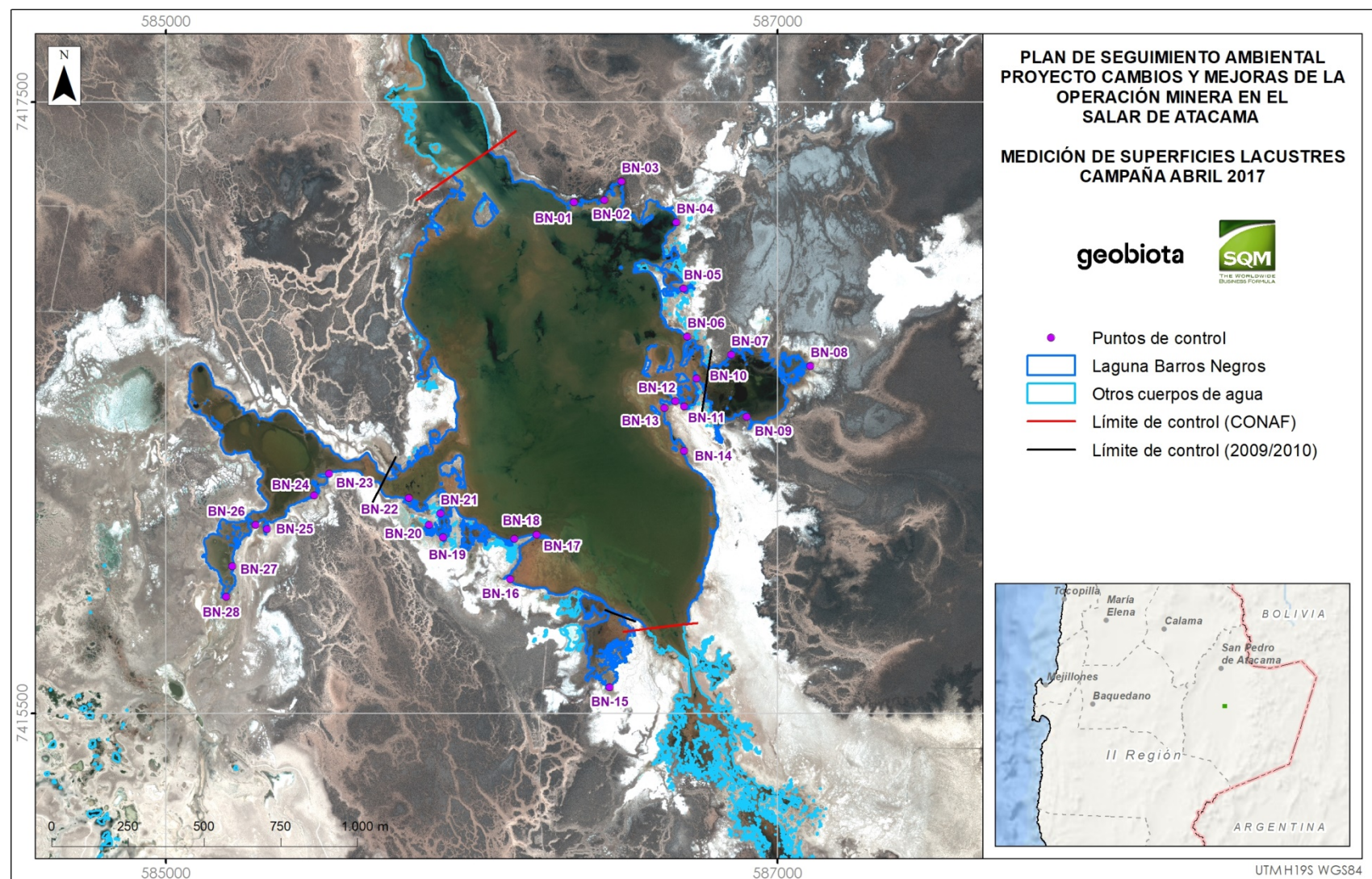


Punto BN-15
UTM (WGS84 H19) E 586.452 - N 7.415.585
Foto tomada el 08-04-2017



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5-4. Mapa de ubicación puntos de control de terreno Laguna Barros Negros, campaña 2017



5.1.3. Laguna Puilar

Laguna Puilar comprende un cuerpo principal de agua, con presencia de límites definidos (Figura 5-5, Punto PU-04) y difusos. Los límites difusos están constituidos principalmente por un sustrato barroso húmedo y montículos sedimentarios, correspondientes a nidos de flamencos utilizados en los periodos de nidificación (Figura 5-5, punto PU-13).

En el límite sur se observa un canal de descarga con flujo norte-sur cuyo borde es difuso en gran parte de su recorrido debido al sedimento explicado anteriormente. Aquí se propuso un límite definido por parte de una mesa de trabajo en la que participo tanto el Titular como distintas autoridades el año 2010 ⁴ para identificar el cuerpo principal de la laguna el cual fue creado en base al registro histórico que se tenía de la laguna en dicho momento.

Figura 5-5. Fotografías de puntos de control de terreno. Laguna Puilar

Punto PU-04
UTM (WGS84 H19) E 587.349 - N 7.422.327
Foto tomada el 07-04-2017



Punto PU-13
UTM (WGS84 H19) E 587.188 - N 7.422.541
Foto tomada el 07-04-2017

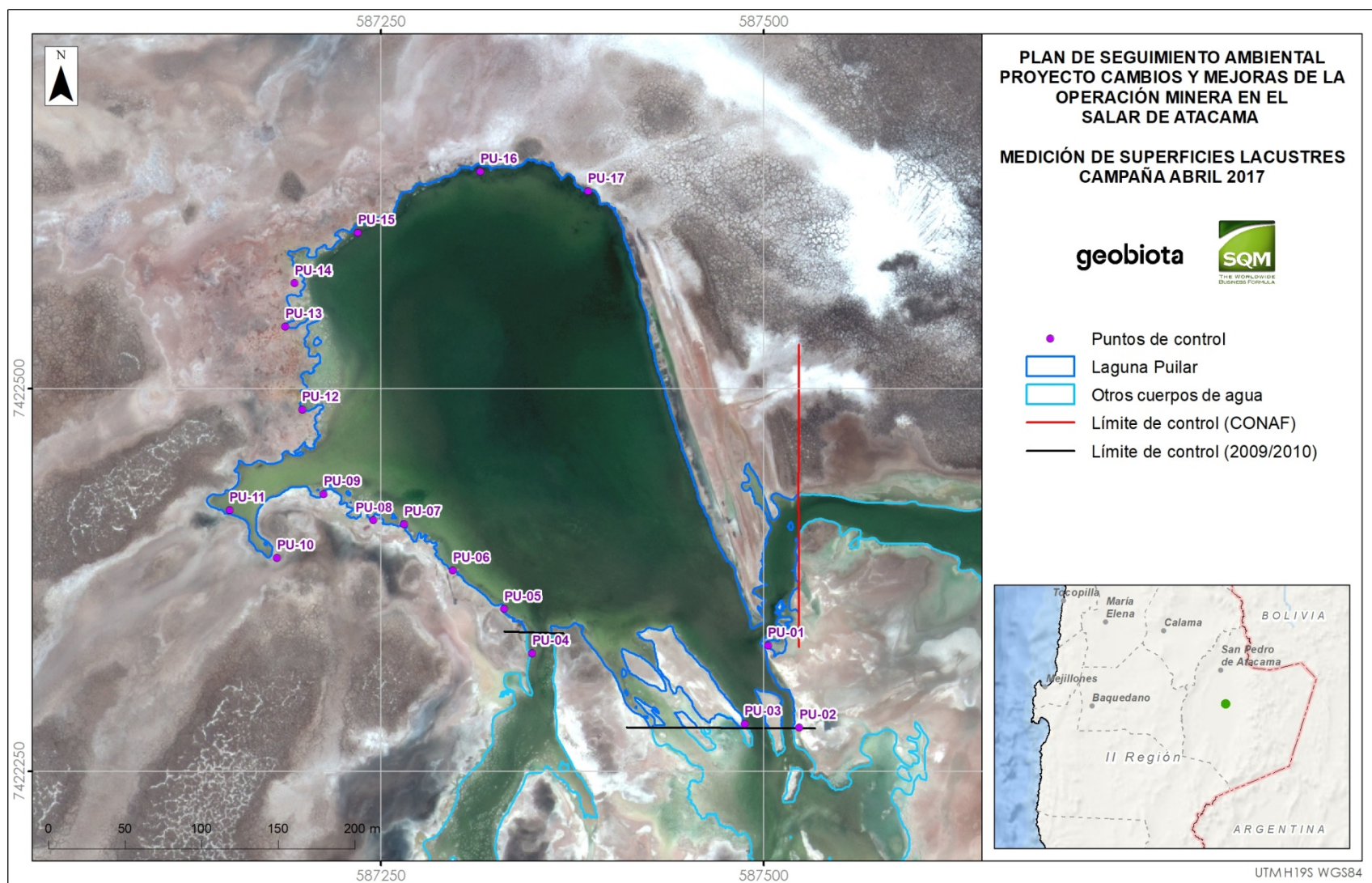


Fuente: Elaboración propia.

A continuación, en la Figura 5-6, se muestran los puntos de control de terreno durante la campaña de abril 2017 para laguna Puilar y los tres límites considerados para restringir la superficie.

⁴ Límite presentado en informe de superficies de laguna año 2010

Figura 5-6. Mapa de ubicación puntos de control de terreno Laguna Puilar, campaña 2017



5.1.4. Desborde Sur (Zona de inundación)

Este cuerpo de agua, incorporada al control y monitoreo desde el año 2016, corresponde a un cuerpo que se origina como desborde de la Laguna Barros Negros y no corresponde a una unidad regular permanente como lo son las lagunas de Chaxa, Barros Negros y Puilar. Debido a esto, se observan límites difusos en el contorno (Figura 5-7, puntos DS-03 y DS-09)

Figura 5-7. Fotografías de puntos de control de terreno. Laguna Desborde Sur

Punto DS-03
UTM (WGS84 H19) E 587.304 - N 7.413.966
Foto tomada el 09-04-2017



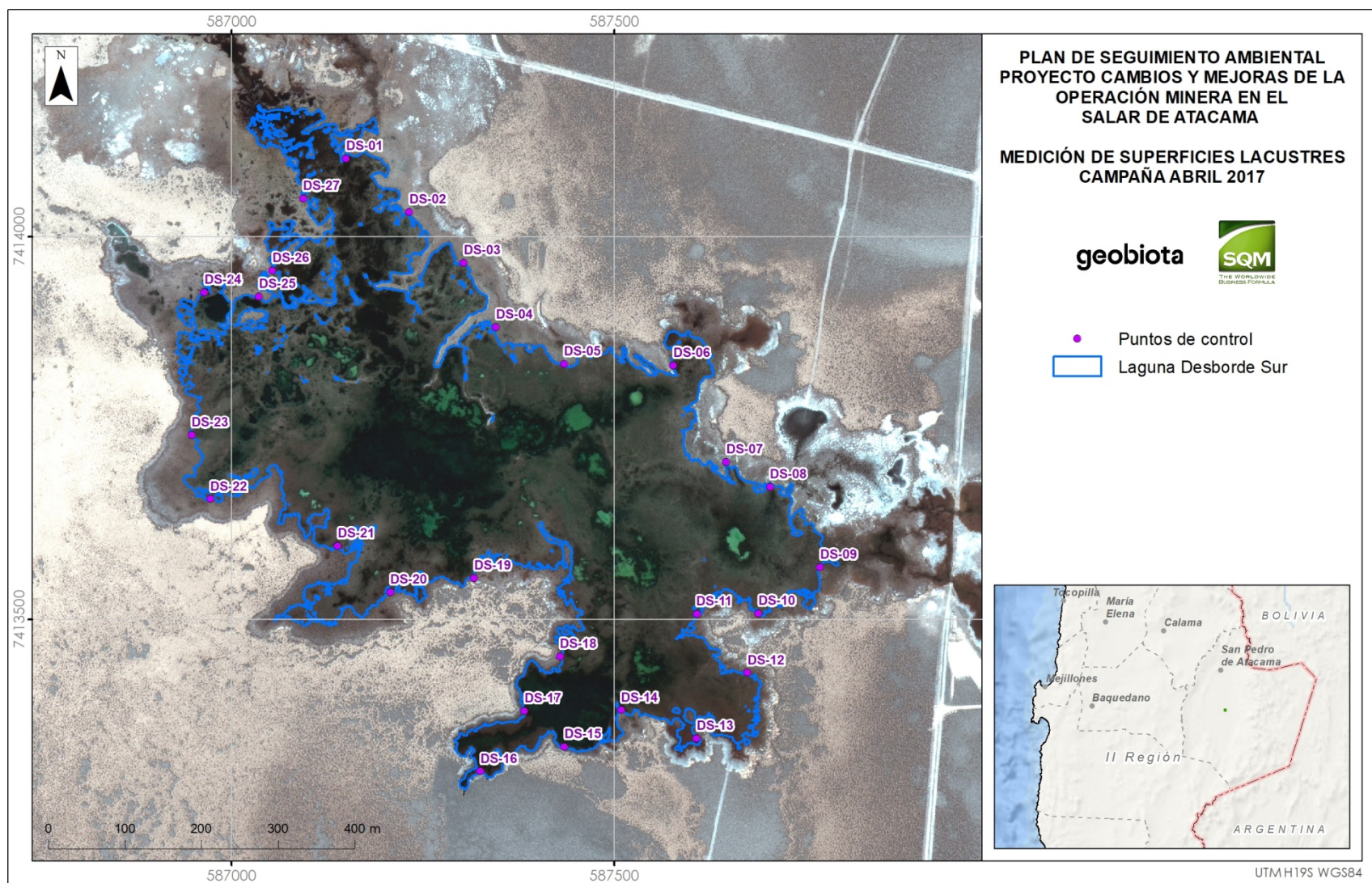
Punto DS-09
UTM (WGS84 H19) E 587.769 - N 7.413.568
Foto tomada el 09-04-2017



Fuente: Elaboración propia.

Los puntos de control de terreno, los cuales ayudan a determinar de mejor maneras los límites de las superficies lacustres, se muestran a continuación en la siguiente Figura 5-8.

Figura 5-8. Mapa de ubicación puntos de control de terreno Laguna Desborde Sur, campaña 2017



5.2. Sistema Peine

En el siguiente acápite se analizará las superficies de las lagunas que componen el sistema Peine y que corresponden a las lagunas Salada, Saladita e Interna. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 5-2.

Tabla 5-2. Superficies de cuerpos lacustres medidas en abril 2017 mediante análisis de imágenes satelitales - Sistema Peine

LAGUNA	SUPERFICIES (m ²)
SALADA	
Cuerpo principal	170.772
Canal de recarga	24.129
Canal de descarga	6.084
Total Salada	200.985
SALADITA	
Cuerpo principal	99.410
Total Saladita	99.410
INTERNA	
Cuerpo principal	405.302
Total Interna	405.302

Fuente: Elaboración propia.

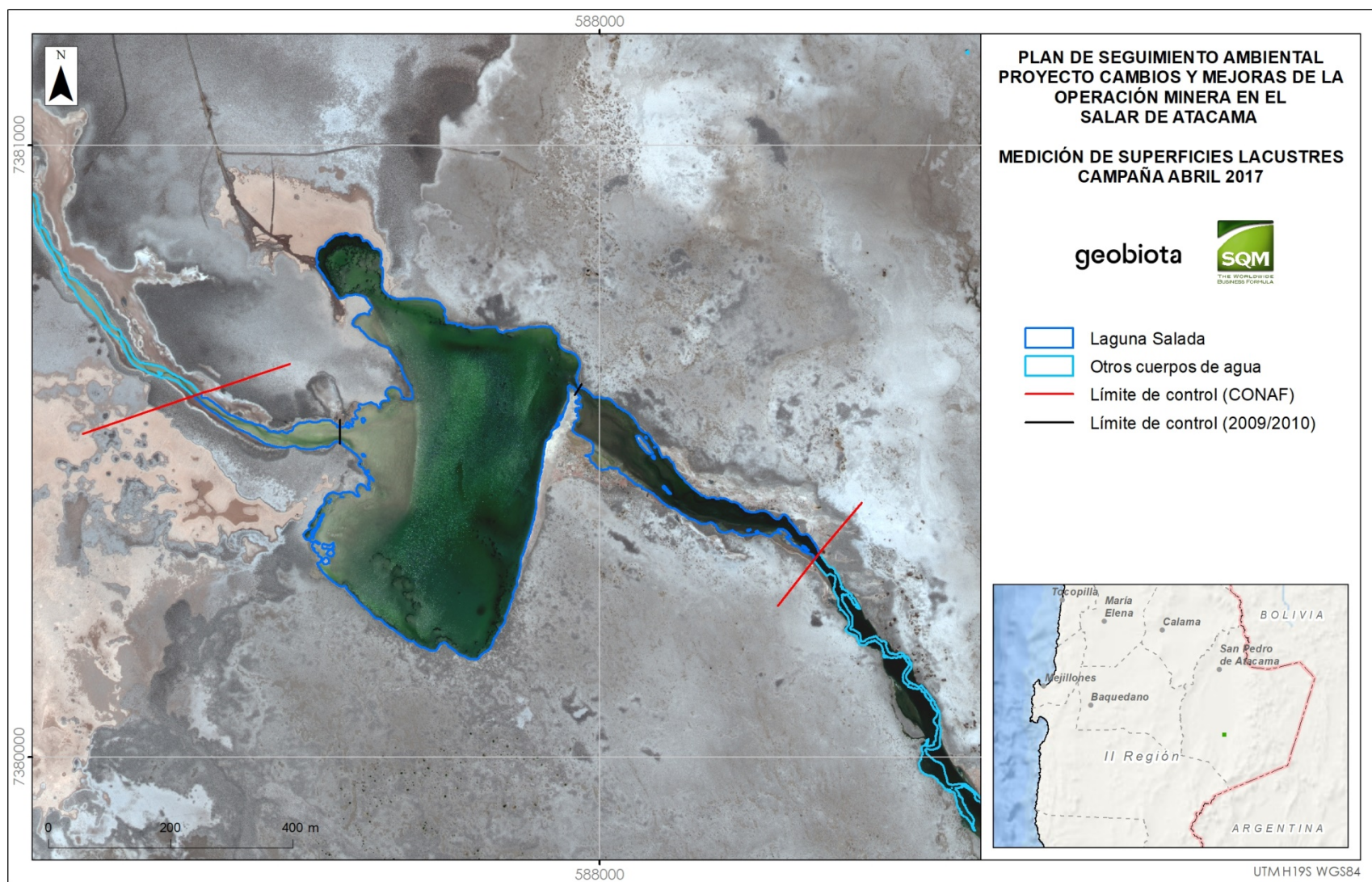
5.2.1. Laguna Salada

Laguna Salada está compuesta por un cuerpo principal y dos canales superficiales. El cuerpo principal muestra contornos más definidos que las otras lagunas observadas, permitiendo una fácil identificación de la laguna. El canal de recarga se ubica en el sector este de la laguna. Este muestra contornos levemente más difusos en comparación con el cuerpo principal, sin embargo las imágenes procesadas permiten aún detectar el contorno del canal. El canal de descarga ubicado en la medianía de la Laguna en el sector Oeste, presenta contornos definidos de forma muy similar al cuerpo de agua principal.

Considerando la restricción de acceso de la comunidad de Peine al sector, la superficie fue calculada sólo sobre la base de procesamiento de imágenes, sin puntos de control de terreno.

A continuación, en la Figura 5-9, se muestra la imagen con el contorno definido en base a las técnicas de procesamiento de imagen. En esta laguna existen cuatro límites que dan origen a los tres sectores de la laguna: Cuerpo principal, Canal de recarga y Canal de descarga.

Figura 5-9. Contorno de Superficie Laguna Salada, campaña 2017

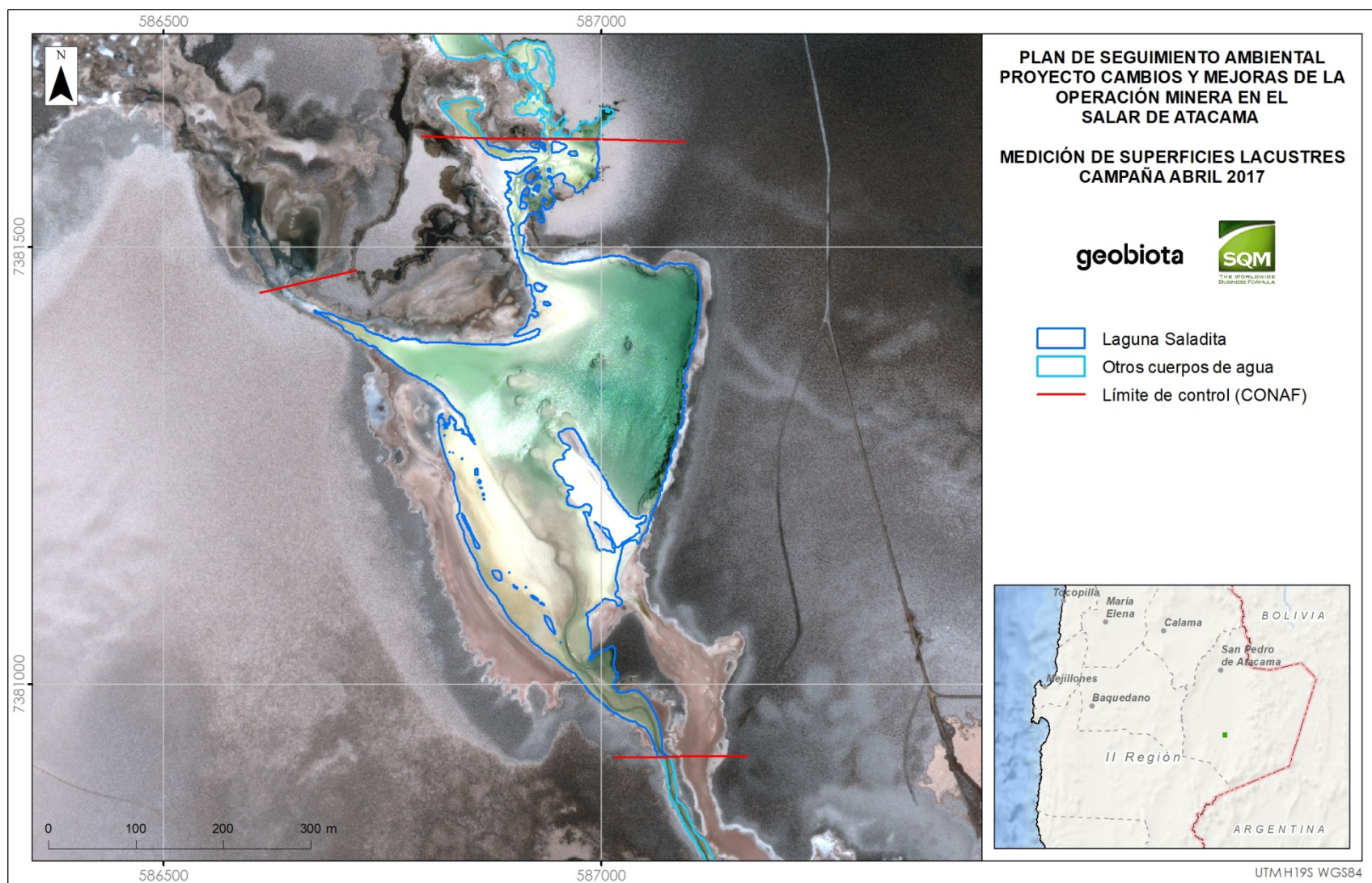


5.2.2. Laguna Saladita

Laguna Saladita, a diferencia de Laguna Salada presenta contornos más difusos, en donde se observan sectores con mayor humedad y, por ende, se hace más complejo el cálculo de su superficie. Se aclara que en el presente monitoreo la superficie fue calculada sólo sobre la base de procesamiento de imágenes, sin puntos de control de terreno, dada la restricción de acceso de la comunidad de Peine al sector.

A continuación, en la Figura 5-10, se muestran la imagen con el contorno definido en base a las técnicas de procesamiento de imagen. En esta laguna existen tres límites CONAF que fueron considerados para la estimación de superficie.

Figura 5-10. Contorno de superficie Laguna Saladita, campaña 2017



5.2.3. Laguna Interna

Tal como se señala en la validación de superficies lacustres del 2009, Interna no conforma un cuerpo lacustre de superficie continua, como es el caso de las otras lagunas analizadas en el sector. En efecto, no es posible distinguir un cuerpo de agua principal que se mantenga estable en el tiempo.

Laguna Interna presenta una importante dinámica morfológica en las temporadas de estudio. Este año se observa una gran extensión en el borde norte. Asimismo, se observan sectores nuevos de inundación en donde en la superficie se observan sedimentos de un color similar al terreno y donde no es posible reconocer dicho sector como parte de la laguna.

Figura 5-11. Fotografías de puntos de control de terreno Laguna Interna.

IN-42
UTM (WGS84 H19) E 584.799 - N 7.383.971
Foto tomada el 13-04-2017



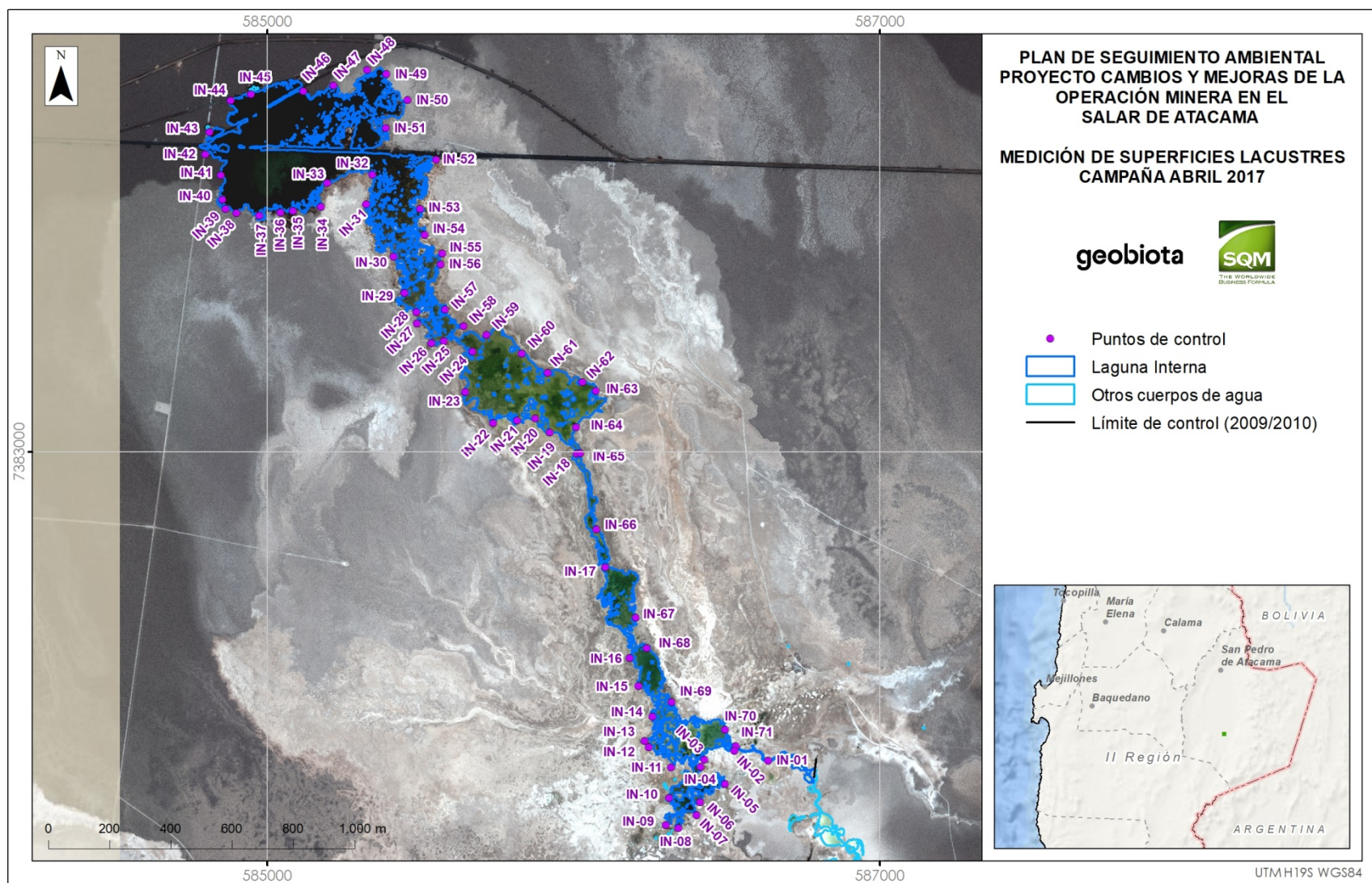
IN-50
UTM (WGS84 H19) E 585.460 - N 7.384.149
Foto tomada el 13-04-2017



Fuente: Elaboración propia.

A continuación, en la Figura 5-12, se muestran los puntos de control de terreno durante la campaña de abril 2017 para laguna Interna. Cabe recalcar, que los límites de esta laguna fueron establecidos respecto del informe 2010, considerando que CONAF no limita su extensión.

Figura 5-12. Mapa de ubicación puntos de control de terreno Laguna Interna, campaña 2017



6. CONCLUSIONES

Se confirma que el uso de imágenes satelitales de alta resolución espacial fusionadas y el apoyo de índices (IHS, TSAVI, MNDWI) representan una herramienta adecuada y necesaria para la definición de límites y cálculo de las superficies en las lagunas analizadas.

La demarcación en terreno de los bordes difusos de los cuerpos de agua, es necesaria para determinar con mayor exactitud tanto los bordes de éstas como también el cálculo de superficie del espejo de agua.

No se pudo realizar el control de terreno para las lagunas Salada y Saladita correspondiente al sector Peine. Ambas lagunas quedaron delimitadas únicamente por el análisis de imágenes satelitales.

La extensión de los cuerpos de agua superficiales del sistema Soncor corresponde a los siguientes:

- Chaxa: 293.310 m²
- Barros Negros: 1.289.158 m²
- Puilar: 69.434 m²
- Desborde Sur: 312.329 m²

Por otro lado, para los cuerpos de agua superficiales del sistema Peine corresponden a los siguientes:

- Salada: 200.958 m²
- Saladita: 99.410 m²
- Interna: 405.302 m²

7. REFERENCIAS

Chuvieco, E., 2002. Teledetección Ambiental. La observación de la tierra desde el espacio. Ediciones Ariel. 578p.

Gilabert, M., González-Piqueras J. & García-Haro J., 1997. Acerca de los índices de vegetación. Revista Española de teledetección N°8 Diciembre. 10 p.

McFeeters S.K., 1996. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. International Journal of Remote Sensing. 17(7):1425-1432.

Siddiqui, Y. 2003. The modified IHS method for fusing satellite imagery. ASPRS 2003 Annual Conference Proceedings, May 5-9, 2003.