

**Informe técnico**

# **Dinámica de la vegetación del Borde Este del Salar de Atacama en el periodo 1998 – 2019 Región de Antofagasta**

Preparado para  
SQM Salar S.A.  
Octubre, 2021

**geobiota**

GEOB.SQMSL641.INF01.REV(0)30112020



## Contenido

<b>RESUMEN EJECUTIVO .....</b>	<b>4</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>5</b>
<b>2. OBJETIVO .....</b>	<b>6</b>
<b>3. METODOLOGÍA .....</b>	<b>7</b>
3.1. Área de estudio .....	7
3.2. Análisis estadísticos .....	7
3.2.1. Análisis de tendencia .....	8
3.3. Componentes y variables analizadas .....	9
3.3.1. Análisis de la actividad vegetal medida como NDVI .....	9
3.3.2. Análisis de la relación de actividad vegetal con el agua .....	15
<b>4. RESULTADOS .....</b>	<b>19</b>
4.1. Análisis de tendencia de la actividad vegetal medida como NDVI .....	19
4.1.1. Descripción del espectro de valores de NDVI presentes en el Borde Este .....	19
4.1.2. Análisis de tendencia de los NDVI en el periodo completo (1998 – 2019) .....	21
4.2. Relación de la vegetación medida como NDVI con la profundidad de la napa en el periodo completo (1998 – 2019) .....	24
4.2.1. Análisis de relación vegetación – profundidad en el periodo 2008 – 2019 .....	24
4.3. Relación de la vegetación medida como NDVI con las precipitaciones locales .....	31
<b>5. DISCUSIONES .....</b>	<b>34</b>
5.1. Análisis de tendencia de la actividad vegetal medida como NDVI .....	34
5.2. Relación de la vegetación con el agua .....	35
<b>6. CONCLUSIONES .....</b>	<b>36</b>
<b>7. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>37</b>

## Tablas

Tabla 3-1. Fuentes de información para cada variable analizada .....	9
Tabla 3-2. Satélite y escenas utilizados por año de análisis en el escenario Landsat SR (nivel 2) .....	13
Tabla 3-3. Fuentes de información de la profundidad de la napa por periodo de análisis .....	17
Tabla 4-1. Superficie y participación porcentual de los tipos vegetacionales con tendencia en el Periodo completo (1998 – 2019) .....	22

Tabla 4-2. Unidades con tendencia a la baja y fuente de información de profundidad utilizado para establecer relaciones estadísticas .....	25
Tabla 4-3. Superficie y porcentaje de los tipos vegetacionales relacionados con la precipitación local ...	32

## Figuras

Figura 3-1. Área de estudio.....	7
Figura 3-2. Representación gráfica del modelo de regresión lineal y sus parámetros de cálculo. ....	8
Figura 3-3. Ejemplos de firma espectral de la vegetación .....	9
Figura 3-4. Relación de porcentaje de cobertura de vegetal obtenida en terreno mediante transectos y valores medios de NDVI obtenidos del análisis de imágenes. Borde Este del Salar de Atacama. ....	11
Figura 3-5. Histograma de frecuencia del ráster NDVI del área cubierta con vegetación según Mapa anual 2019.....	14
Figura 3-6. Sección para ejemplificar las diferencias entre las unidades vegetacionales proveniente del mapa anual (830 polígonos) y la re-segmentación mediante la clasificación de valores NDVI sobre el mapa 2019 (2.204 polígonos).....	15
Figura 3-7. Ejemplo gráfico de relaciones profundidad-NDVI con y sin sentido biológico.....	17
Figura 3-8. Ejemplo gráfico de relaciones precipitación-NDVI con y sin sentido biológico.....	19
Figura 4-1. Distribución de frecuencia de pixeles de NDVI de abril en el área cubierta con vegetación del borde este del Salar de Atacama.....	20
Figura 4-2. Promedio de los valores NDVI del área cubierta con vegetación en el Borde Este del Salar de Atacama en el periodo 1998 y 2019.....	20
Figura 4-3. Valores promedios NDVI de unidades con tendencia al alza para cada tipo vegetacional en el Periodo completo (1998 – 2019).....	21
Figura 4-4. Valores promedios NDVI de unidades con tendencia a la baja para cada tipo vegetacional en el Periodo completo (1998 – 2019).....	22
Figura 4-5. Distribución de área con tendencia en el Periodo completo (1998 – 2019) .....	23
Figura 4-6. Análisis de la relación NDVI – profundidad (m) en polígonos con tendencia a la baja en periodo completo (2008 – 2019).....	26
Figura 4-7. Precipitación anual (mm) de la estación meteorológica Camar .....	31
Figura 4-8. Distribución de sectores relacionados con la precipitación local en el Periodo completo (1998 – 2019).....	32
Figura 4-9. Variación los sectores con relación NDVI precipitaciones en el periodo completo (1998 – 2019) .....	33
Figura 5-1. Proporción de la superficie total con tendencias en el periodo 1998-2019.....	34

## RESUMEN EJECUTIVO

El presente informe analiza el comportamiento de la vegetación durante los años 1998 y 2019 en el Borde Este del Salar de Atacama. Se considera una superficie de 47.723,77 ha y un periodo de 22 años con información de imágenes satelitales Landsat SR (nivel 2) (año 1998 a 2019).

Las principales conclusiones derivadas del informe indican lo siguiente.

1. **El análisis de tendencia de la actividad vegetal medida como NDVI.** Para el periodo 1998 – 2019, los resultados muestran que la superficie sin tendencia al alza o baja en el tiempo predomina (90,7% de la superficie con vegetación), mientras que el 8,2% de la superficie posee tendencia al alza y una superficie aún menor a la baja (1,1% del total).
2. **El análisis de relación medida como NDVI con la profundidad del nivel freático** fue posible realizarse entre el periodo 2008-2019, periodo en el cual, se cuenta con una serie completa de registros del nivel freático derivado del Plan de seguimiento hidrogeológico (PSAH). En este análisis, se identificó que la relación entre la profundidad y las unidades con tendencia a la baja resultó no ser significativa, evidenciando que el nivel freático no explicaría los cambios observados en la vegetación, por lo que no se verificarían efectos del proyecto "Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama" (RCA N°226/2006).
3. **Del análisis NDVI respecto a las precipitaciones destaca que:** los efectos de la precipitación sobre la vegetación en el periodo 1998-2019 se producen principalmente en abanicos aluviales, quebradas y secciones más altas del borde este del Salar de Atacama, sectores donde la vegetación estaría desconectada del acuífero, lo que muestra consistencia con el modelo conceptual de la vegetación. Se identificó una estrecha relación entre los pastos de lluvia (formaciones matorral de Káuchal y pradera de Lukupa) y las precipitaciones, al verificarse que el 98,8% de la superficie cubierta con matorral de Káuchal (643,9 ha) y el 98,2% de la superficie de la pradera de Lukupa (2.523,7 ha) están relacionadas con las precipitaciones.

## 1. INTRODUCCIÓN

El presente informe — preparado por Geobiota a solicitud de SQM Salar S.A.— analiza la dinámica temporal y estado actual de la vegetación del Borde Este del Salar de Atacama (Comuna de San Pedro de Atacama, Región de Antofagasta), incorporando las observaciones del Consejo de Pueblos Atacameños (CPA), mediante el documento “Observaciones al programa de cumplimiento ambiental del Titular SQM Salar S.A”, en el cual se observó, indicó y solicitó, Incluir el análisis estadístico considerando la serie de tiempo completa y no dividida por periodos de los datos de vegetación.

Las bases de datos examinadas provienen de imágenes satelitales Landsat SR (nivel 2), en un periodo de 22 años, tal como fue requerido por la Superintendencia de Medio Ambiente en el memorándum N°21068/2021 (SMA) y en la reunión técnica con SQM, celebrada de manera remota el lunes 13 de septiembre 2021. Donde se plantearon lineamientos para la actualización del Apéndice 1.6 del Plan de Cumplimiento Refundido.

Los contenidos del presente informe se organizan en las siguientes secciones:

- **Métodos.** Detalla el tratamiento de datos y los métodos de análisis empleados para evaluar las tendencias en la vegetación en el periodo 1998 – 2019.
- **Resultados.** Presenta el producto e interpretación ecológica del análisis efectuado.
- **Discusión.** Propone una interpretación de los resultados a la luz del conocimiento científico disponible.
- **Conclusiones.** Presenta los hallazgos más relevantes identificados en el presente estudio.
- **Anexos.** Corresponde a contenidos ampliados de la información expuesta en el presente documento, a saber:
  - a. Anexo 1. Estadígrafos del análisis de tendencia de la actividad vegetal medida como NDVI y de la relación de la vegetación con el agua en el periodo 1998-2019.

## 2. OBJETIVO

Se analizan las tendencias de las unidades vegetacionales a partir de valores NDVI en el periodo 1998 – 2019 con el objeto de evaluar el estado global de la vegetación en el Borde Este del Salar de Atacama.

El detalle de los procedimientos y técnicas utilizadas para cumplir con el objetivo propuesto se describe en la Sección 3 (Metodología).

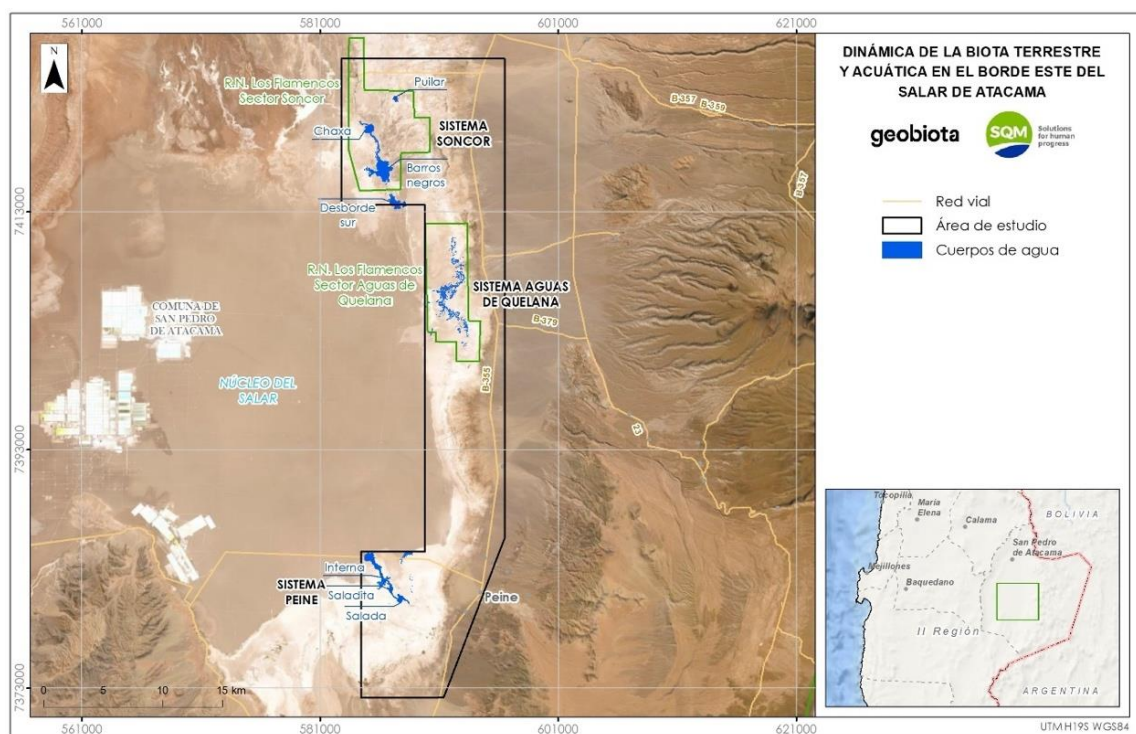
### 3. METODOLOGÍA

El análisis y evaluación de la dinámica temporal y estado actual de la vegetación se efectuó mediante técnicas estadísticas de tendencia temporal aplicados al periodo 1998 – 2019.

#### 3.1. Área de estudio

El área de estudio corresponde al Borde Este del Salar de Atacama, emplazado en la cuenca endorreica Salar de Atacama, Región de Antofagasta que, a su vez, corresponde al área que forma parte del Plan de Seguimiento Ambiental (PSA) de vegetación, flora, fauna y biota acuática del Proyecto “Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama” (RCA N°226/2006) y, por lo tanto, al área donde se emplazan los objetos de protección vinculados a la operación del Proyecto. Tiene una superficie total de 47.723,5 ha y su emplazamiento se presenta en la Figura 3-1.

**Figura 3-1. Área de estudio**



#### 3.2. Análisis estadísticos

Se realizó un tipo de prueba estadística en función del objetivo propuesto, a saber:

1. Análisis de tendencia en el periodo completo (1998 – 2019): mediante correlación estadística entre variables,

Los análisis de correlación permiten establecer de manera descriptiva, el comportamiento de la variable analizada en función del tiempo (serie temporal), específicamente, dentro del periodo establecido;

La descripción y detalle de los procedimientos ejecutados, se desarrolla a continuación.

### 3.2.1. Análisis de tendencia

Para evaluar la existencia del comportamiento temporal de las variables analizadas y determinar la existencia de aumento o disminución dentro del periodo establecido, se utilizó el método de regresión lineal simple entre la variable y los años que componen el periodo de análisis.

El procedimiento ejecutado consistió en la generación de modelos de regresión lineal, cuya expresión matemática corresponde a:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon$$

Donde:

Y: variable dependiente analizada

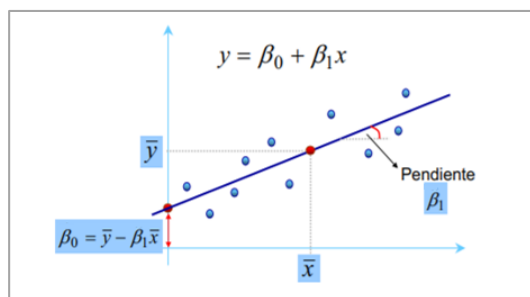
$\beta_0$ : Intercepción

X: variable independiente (serie temporal)

$\beta_1$ : pendiente de la regresión (tasa de cambio)

$\varepsilon$ : Error aleatorio o residual

**Figura 3-2. Representación gráfica del modelo de regresión lineal y sus parámetros de cálculo.**



Para determinar la relación entre las variables, el análisis establece que la hipótesis de trabajo corresponde a  $H_0: \beta_1 = 0$ . Con ello se pretende verificar estadísticamente que, de existir correlación entre las variables, el valor de la pendiente del modelo (parámetro  $\beta_1$ ) debe ser significativamente distinto de cero, de manera que la variación en una de las variables esté relacionada con la variación observada en la otra.

La significancia estadística de la correlación entre las variables se determinó por medio del valor-p obtenido para cada modelo de regresión elaborado. Como nivel de significancia se estableció  $\alpha = 0,05$ , dicho de otro modo, se estableció un nivel de confianza de 95% para determinar la existencia de correlaciones estadísticamente significantes.

Para determinar la existencia de correlaciones estadísticamente significantes, se utilizó como criterio de decisión el valor-p  $< 0,05$ . Cuando el valor-p resulta mayor a 0,05, se acepta la hipótesis  $H_0$ , por lo cual no existe evidencia estadística que permita sustentar la relación entre las variables analizadas.

El grado de relación (fuerza de asociación) entre las variables analizadas en función del tiempo, se expresó por medio del coeficiente de correlación de Pearson ( $R^2$ ). Este índice mide la proporción de variación de la variable dependiente (Y) que es explicada por la variable independiente (X) y puede tomar valores que van desde -1 a +1. El signo de  $R^2$ , representa la dirección de la correlación (aumento o descenso) y su valor numérico, la magnitud de la correlación entre las variables. Adicionalmente se considera una relación de efecto leve o pequeño si el coeficiente de correlación se encuentra entre 0,1 y 0,3; de efecto medio si el coeficiente se encuentra entre 0,3 y 0,5; y de efecto grande o alto si el coeficiente es mayor a 0,5 (Cohen, 1988).



Es relevante señalar que el análisis de tendencia es de carácter descriptivo, permitiendo establecer el comportamiento temporal de las variables analizadas.

### 3.3. Componentes y variables analizadas

Con el objetivo analizar y evaluar la dinámica temporal y estado actual de la vegetación del Borde Este del Salar de Atacama, se utilizaron diversas fuentes de información para cada componente y variable analizada, las que se presentan a continuación (Tabla 3-1):

**Tabla 3-1. Fuentes de información para cada variable analizada**

Componente	Variable	Fuente de información
Vegetación	Superficie de la vegetación	Línea base biótica y Plan de Seguimiento Ambiental (PSA) del Proyecto “Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama.
	NDVI	Imágenes satelitales Landsat TM y ETM nivel 2 (SR)

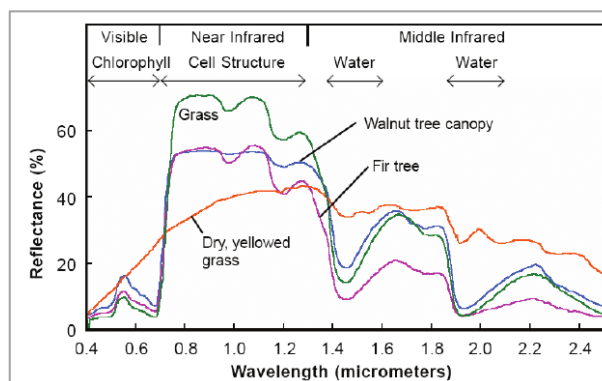
En el Anexo 2 del Apéndice 1.6 refundido, se presenta la base de datos empleada para el desarrollo de los análisis estadísticos según variable y componente estudiada.

#### 3.3.1. Análisis de la actividad vegetal medida como NDVI

Con el objeto de analizar la evolución y los cambios de la vegetación, se utilizó el índice NDVI como variable de estado de la vegetación según imágenes satelitales Landsat SR (nivel 2).

El NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) es un índice de vegetación que permite realzar y representar de manera precisa la actividad fotosintética de las coberturas vegetales. Estos índices se basan en el particular comportamiento radiométrico, en el que la hoja sana absorbe la mayor parte de la energía en el espectro de la banda roja (0,6 a 0,7  $\mu\text{m}$ ) y la refleja en el infrarrojo cercano (0,7 a 1,1  $\mu\text{m}$ ), produciéndose un notable contraste espectral entre estas bandas. En los casos que la vegetación sufre algún tipo de estrés, su reflectividad es inferior en el infrarrojo y aumentando paralelamente en el rojo, siendo menor el contraste entre dichas bandas (Figura 3-3) (Chuvieco, 2002). En consecuencia, cuanto mayor sea el contraste entre la banda infrarroja (IR) y roja (R), mayor vigor vegetal presentará la cubierta observada. Bajos valores de contraste indican una vegetación enferma o senescente, hasta llegar a las cubiertas sin vegetación, que ofrecen un contraste muy pequeño (Chuvieco, 2002).

**Figura 3-3. Ejemplos de firma espectral de la vegetación**



En este principio físico se apoyan una amplia gama de índices de vegetación, y específicamente el NDVI se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$NDVI = \frac{\rho_{IRC}(x,y) - \rho_R(x,y)}{\rho_{IRC}(x,y) + \rho_R(x,y)}$$

Dónde:

$\rho_R$  : Reflectancia en la banda del rojo

$\rho_{IRC}$  : Reflectancia en la banda del infrarrojo cercano

En el análisis pixel a pixel, los valores del NDVI varían entre -1 y 1. En términos prácticos, se considera que valores sobre 0,1 podrían considerarse como vegetación (Chuvieco, 2002). Sin embargo, este valor es meramente referencial, por cuanto depende directamente a la influencia del suelo de fondo, el cual depende principalmente de la arquitectura del dosel, cobertura vegetal, estado fenológico y estado fitosanitario (Aguilar *et al.*, 2010; Chuvieco, 2002).

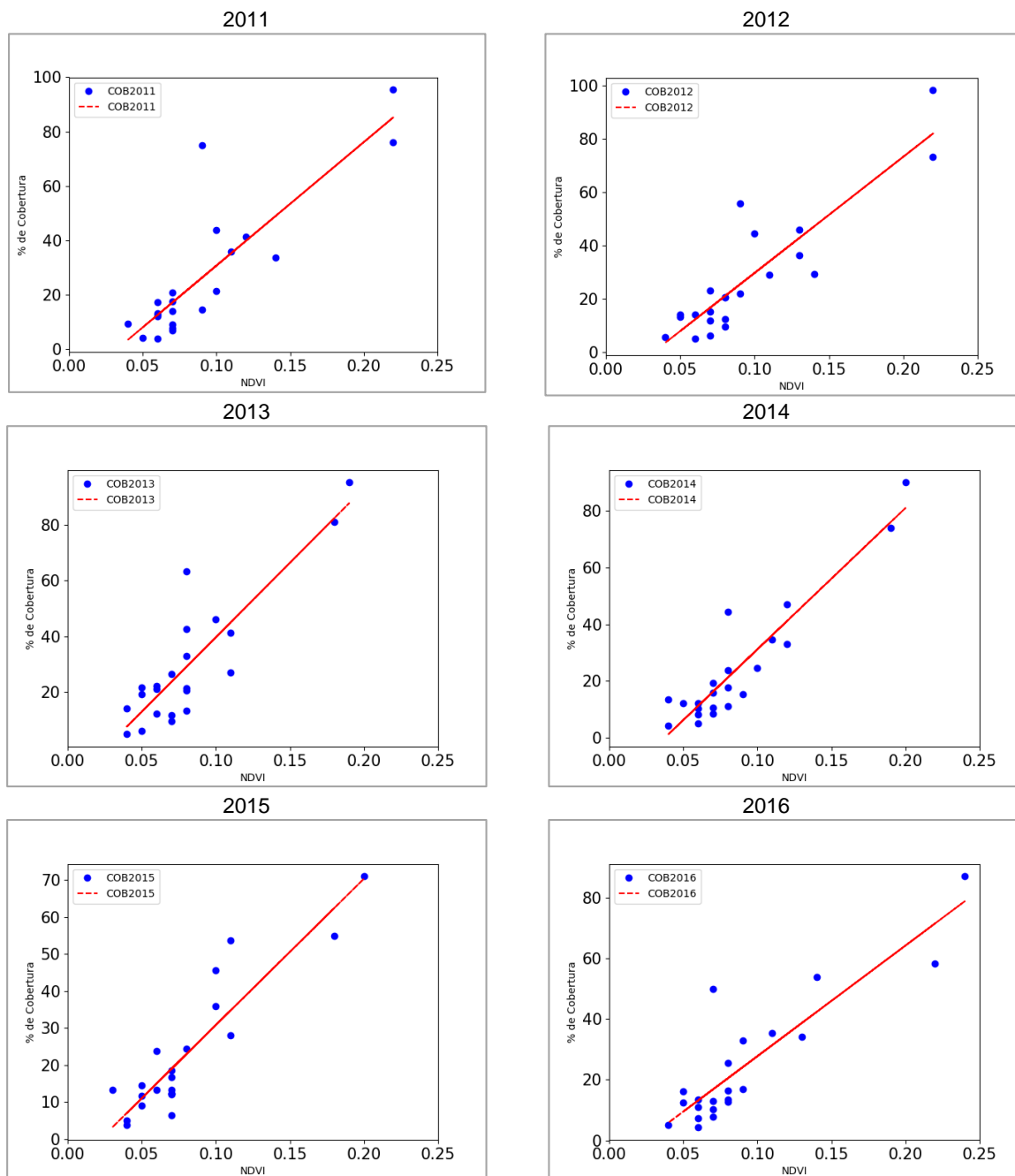
En líneas generales, el NDVI se considera un buen estimador de la biomasa, usándose constantemente en la evaluación del contenido de clorofila en la hoja, contenido de humedad en la hoja, productividad neta de la vegetación e índices de área foliar fenología y la cobertura de la vegetación, entre otras (SMA, 2020, Soto *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2018; Wilson y Norman, 2018, Meneses-Tovar, 2011, Aguilar *et al.*, 2010, Chuvieco, 2002).

Es así como en estudios de cobertura de la vegetación se han identificado altas correlaciones entre el valor NDVI y el porcentaje de cubierta verde, lo que resulta lógico dado que ambas variables se vinculan a través de los mecanismos típicos de las plantas (Chuvieco, 2002).

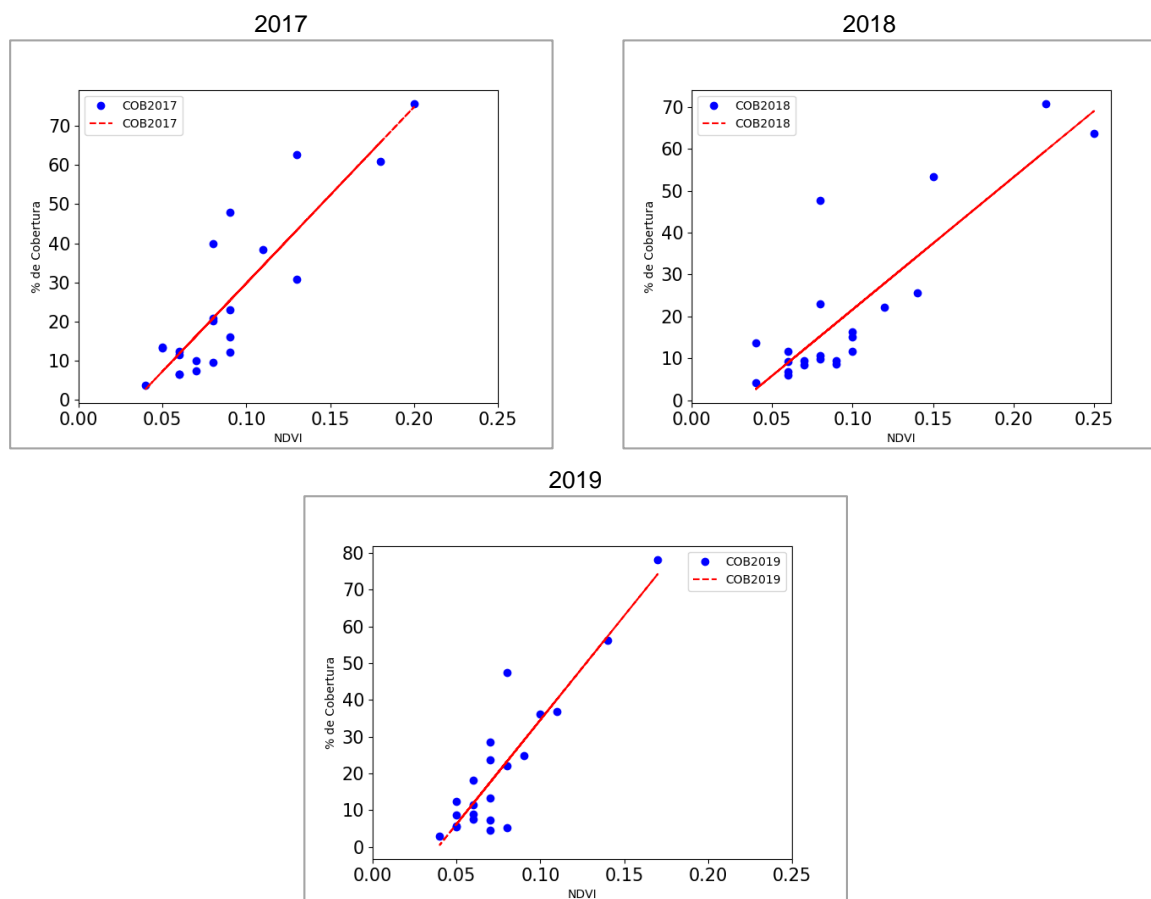
Esta afirmación se ratifica al contrastar valores NDVI de la serie Landsat con la cobertura vegetal medida en terreno en el Borde Este del Salar de Atacama en el contexto del Monitoreo de indicadores de estado biótico. Al respecto, se verifica una relación estadísticamente significativa entre las variables ( $p < 0,05$ ) y con niveles de ajuste ( $R^2$ ) que varían entre los 0,7 y 0,87, lo que evidencia la estrecha relación entre la cobertura vegetal y los valores de NDVI, conforme a lo expuesto en la Figura 3-4.

Este monitoreo de indicadores de estado biótico consiste en la medición de cobertura vegetal a partir de 22 conglomerados en terreno, cada uno de los cuales está compuesta por tres transectos de 100 m (66 transectos en total) en los cuales se realizaron registros cada 10 cm (Point Quadrat). Esto permite determinar de manera precisa, tanto la cobertura de la vegetación como la composición de especies vegetales presentes. En este sentido, la cobertura de la vegetación expresada de manera porcentual (%) se determinó en base al total de registros con presencia de plantas, respecto del total de observaciones efectuadas en el transecto. Cabe señalar que estas muestras se distribuyen en zonas cubiertas por matorral de brea y el pajonal de Junquillo - Totorá - Suncho (vegetación hidromorfa) del borde este del Salar

**Figura 3-4. Relación de porcentaje de cobertura de vegetal obtenida en terreno mediante transectos y valores medios de NDVI obtenidos del análisis de imágenes. Borde Este del Salar de Atacama.**



**Figura 3-4. Relación de porcentaje de cobertura de vegetal obtenida en terreno mediante transectos y valores medios de NDVI obtenidos del análisis de imágenes. Borde Este del Salar de Atacama.**



Con el objeto de evaluar la vegetación de manera objetiva, se planteó la evaluación de la actividad vegetal medida como NDVI en toda el área de seguimiento. Asimismo, se planteó una evaluación integral de la dinámica de la vegetación, considerando analizar el periodo completo con la finalidad de contar con antecedentes de la dinámica natural del sistema vegetal del Borde Este del Salar de Atacama.

De acuerdo con las indicaciones de la Superintendencia de Medio Ambiente (SMA), mediante la resolución exenta N°34/ROL F-041-2016, el memorándum N°21068/2021 (SMA) y en la reunión técnica con SQM, celebrada de manera remota el lunes 13 de septiembre 2021, indicó la utilización de imágenes satelitales Landsat SR - nivel 2 y otras mejoras como la subdivisión de las unidades vegetacionales con el objeto de diferenciar diversos niveles de vigor (2204 unidades vegetacionales).

Considerando la buena relación entre la cobertura y el NDVI, y a que es un indicador válido y usado universalmente para el monitoreo de vegetación en diversas situaciones y ambientes (SMA, 2020, Soto *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2018; Wilson y Norman, 2018, Meneses-Tovar, 2011, Aguilar *et al.*, 2010), y las indicaciones de la SMA, se planteó la estimación de la evolución temporal de la actividad de la vegetación del Borde Este del Salar de Atacama, realizando un análisis de tendencia de la actividad vegetal medida como NDVI en el periodo 1998-2019 utilizando el escenario metodológico Landsat SR – nivel 2.

Análisis de la actividad vegetacional mediante imágenes Landsat SR (nivel 2)

Para el análisis según imágenes satelitales Landsat SR (Nivel 2) se utilizaron las siguientes fuentes de datos:

- **Imágenes satelitales 5 TM o Landsat 7 ETM SR - nivel 2 (reflectividad en superficie)**, los cuales mediante la aplicación de ecuación de re-escalamiento, los pixeles se traducen en reflectividad de superficie, cuya variable es comparable de manera inmediata entre escenas.

Se utilizaron 22 imágenes multiespectrales Landsat 5 TM o Landsat 7 ETM (path-row: 233-076) de acuerdo a su disponibilidad, considerando el mes de abril de cada año. El detalle de los ID, fecha de captura y satélite de cada escena utilizada se presenta en la Tabla 3-2.

**Tabla 3-2. Satélite y escenas utilizados por año de análisis en el escenario Landsat SR (nivel 2)**

Año	Imágenes Landsat SR - nivel 2		
	ID	Sensor	Fecha de adquisición
1998	LT05_L2SP_233076_19980419_20200909_02_T2_SR	Landsat 5	19-04-1998
1999	LT05_L2SP_233076_19990406_20200908_02_T1_SR	Landsat 5	06-04-1999
2000	LT05_L2SP_233076_20000424_20200907_02_T1_SR	Landsat 5	24-04-2000
2001	LT05_L2SP_233076_20010427_20200906_02_T1_SR	Landsat 5	27-04-2001
2002	LE07_L2SP_233076_20020406_20200916_02_T1_SR	Landsat 7	06-04-2002
2003	LE07_L2SP_233076_20030409_20200916_02_T1_SR	Landsat 7	09-04-2003
2004	LT05_L2SP_233076_20040403_20201008_02_T1_SR	Landsat 5	03-04-2004
2005	LT05_L2SP_233076_20050422_20200902_02_T1_SR	Landsat 5	22-04-2005
2006	LT05_L2SP_233076_20060409_20200901_02_T1_SR	Landsat 5	09-04-2006
2007	LT05_L2SP_233076_20070428_20200830_02_T1_SR	Landsat 5	28-04-2007
2008	LT05_L2SP_233076_20080414_20200829_02_T1_SR	Landsat 5	14-04-2008
2009	LT05_L2SP_233076_20090417_20200828_02_T1_SR	Landsat 5	17-04-2009
2010	LE07_L2SP_233076_20100412_20200911_02_T1_SR	Landsat 7	12-04-2010
2011	LT05_L2SP_233076_20110423_20200822_02_T1_SR	Landsat 5	23-04-2011
2012	LE07_L2SP_233076_20120401_20200909_02_T1_SR	Landsat 7	01-04-2012
2013	LE07_L2SP_233076_20130404_20200907_02_T1_SR	Landsat 7	04-04-2013
2014	LE07_L2SP_233076_20140423_20200906_02_T1_SR	Landsat 7	23-04-2014
2015	LE07_L2SP_233076_20150426_20200904_02_T1_SR	Landsat 7	26-04-2015
2016	LE07_L2SP_233076_20160412_20200902_02_T1_SR	Landsat 7	12-04-2016
2017	LE07_L2SP_233076_20170415_20200831_02_T1_SR	Landsat 7	15-04-2017
2018	LE07_L2SP_233076_20180402_20200829_02_T1_SR	Landsat 7	02-04-2018
2019	LE07_L2SP_233076_20190421_20200825_02_T1_SR	Landsat 7	21-04-2019

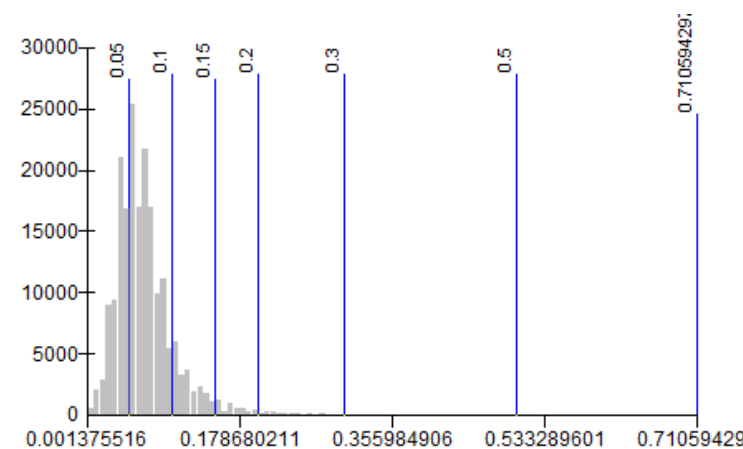
Es necesario indicar que, los valores ausentes producto del bandeo fueron reemplazados por pixeles de escenas temporalmente próximas. Es así como, de las 9 escenas con bandeos, en 7 periodos fueron reemplazadas por escenas capturadas en el mes de abril (mes de los análisis) y en dos periodos, con escenas de marzo.

El detalle del procesamiento de estas imágenes se presenta en la sección 2.2 del Anexo 4. Del Apéndice 1.6 Refundido.

- **Re-segmentación de las unidades con vegetación provenientes del mapa de vegetación del Borde Este del Salar de Atacama 2019.** En la reunión técnica sostenida con la SMA el día 13 de septiembre 2021, la autoridad ambiental solicitó la subdivisión de las unidades vegetacionales considerando diversos niveles de “vigor”.

Para estos fines, se revisó de la frecuencia y dispersión de valores de NDVI para toda el área cubierta con vegetación en el Borde Este de Salar de Atacama (17.495,8 ha representadas en Mapa de vegetación elaborado en 2019, para el PSA del Proyecto). Ello permitió establecer el rango total de valores de NDVI (valores máximos y mínimos) como también los rangos particulares que presentaron la mayor frecuencia (cantidad de píxeles) dentro de toda el área de estudio (Figura 3-5).

**Figura 3-5. Histograma de frecuencia del ráster NDVI del área cubierta con vegetación según Mapa anual 2019**



En base a ello, se pudieron establecer 7 categorías de valores de NDVI. Las categorías de NDVI definidas se presentan en líneas azules de la Figura 3-5. Mediante este procedimiento, cada una de las unidades vegetacionales originales (830 polígonos) fueron divididos en unidades más pequeñas y que representan una única categoría de NDVI definida (en base al valor de NDVI de los píxeles que la componen). Ello permitió establecer un nuevo conjunto (más amplio) de unidades vegetacionales, donde los píxeles que la integran presentan valores muy similares y dentro de alguna de las categorías establecidas, considerando un criterio adicional, una superficie mínima de 0,5 ha para ser incorporada en alguna de las categorías de NDVI establecidas.

Este nuevo conjunto de unidades vegetacionales, compuesto por un total de 2.204 polígonos, permitió evaluar con más detalles (a nivel espacial) la evolución de la vegetación a lo largo del tiempo y también con mejor precisión del valor de NDVI (rangos muy reducidos), dado que el procedimiento elimina las distorsiones que podrían incorporarse al análisis considerando el valor promedio de NDVI de las unidades vegetacionales originales. Así también, dado que los valores de NDVI de los píxeles que la componen son muy homogéneos entre sí, es posible hacer seguimiento de la evolución de la vegetación sobre unidades cartográficas más homogéneas en cuanto a la vitalidad (y/o también cobertura) de la vegetación que la componen (Figura 3-6).



Dado que gran parte de los análisis para la re-segmentación requieren la transformación a formato ráster, es que el shapefile de unidades vegetacionales 2019 con respecto a su re-segmentación varían levemente en sus superficies totales.

**Figura 3-6. Sección para ejemplificar las diferencias entre las unidades vegetacionales proveniente del mapa anual (830 polígonos) y la re-segmentación mediante la clasificación de valores NDVI sobre el mapa 2019 (2.204 polígonos)**

Unidades vegetacionales del mapa de vegetación 2019.  
(830 polígonos)



Re-segmentación de las unidades vegetacionales del  
mapa vegetacional 2019 (2.204 polígonos)



### 3.3.2. Análisis de la relación de actividad vegetal con el agua

Esta etapa tiene como objetivo explicar los eventuales cambios de la actividad vegetal producto de la variación de la profundidad de la napa y de las precipitaciones. Lo anterior, se fundamenta en los antecedentes señalados en el modelo conceptual de la vegetación (sección 3.3. del Apéndice 1.6. Refundido) que considera que la principal fuente de abastecimiento de agua de la vegetación del Borde Este es el acuífero aluvial (en la zona somera), el que, a su vez, es recargado por las precipitaciones que recibe directamente, además de la que ocurren en las partes más altas de la cuenca.

De acuerdo con lo anterior, se consideró la profundidad de la napa y las precipitaciones como variables explicativas de los cambios observados en la vegetación, basado en la distribución de la vegetación en el

Borde Este, donde se identifica la existencia de las siguientes franjas vegetacionales cuyo ancho (Este – Oeste) está asociado a la fuente de abastecimiento de agua: 1) Vegetación hidromorfa, 2) Vegetación conectada al acuífero, y 3) Vegetación desconectada al acuífero.

Con el objetivo analizar la relación de la vegetación con el agua, se desarrollaron los análisis:

- Relación de la actividad vegetacional medida como NDVI con respecto a la Profundidad de la napa y,
- Relación de la actividad vegetacional medida como NDVI con respecto a las precipitaciones.

Para establecer las relaciones entre la cobertura de la vegetación (NDVI) y el agua (profundidad de la napa y precipitaciones) se utilizó el método del análisis de regresión lineal. Este análisis permitió determinar la significancia de la pendiente de la recta de cada modelo y, de haber relación, el grado entre ambas variables, expresado por medio del coeficiente de correlación ( $R^2$ ) con una significancia estadística de 95% ( $\alpha=0,05$ ; valor de probabilidad  $p < 0,05$ ).

Respecto a los periodos de análisis empleados para establecer las relaciones de la vegetación con el agua (profundidad de la napa y precipitaciones), es relevante señalar que: el análisis NDVI – Precipitaciones contempla el estudio del periodo completo (1998 – 2019), mientras que el análisis NDVI – Profundidad se limita al periodo (2008 – 2019), ya que desde el año 2008 en adelante existe información proveniente de pozos de monitoreo.

A continuación, se presenta las características de cada análisis:

#### **3.3.2.1. Relación de la tendencia de la actividad vegetacional medida como NDVI con la profundidad del nivel freático**

El objeto de este análisis es determinar si la causa de los detrimentos de la vegetación determinados en el análisis de tendencia, tienen alguna relación con las variaciones observadas en la profundidad de la napa.

De acuerdo a lo anterior, el objeto de análisis fueron aquellas unidades vegetacionales que presentaron tendencia a la baja en su valor de NDVI. Es necesario indicar que, las debido a que no toda el área ni en todo el periodo se cuenta con información de profundidad, finalmente las unidades evaluadas fueron aquellas que cuentan con algún pozo de monitoreo del PSAH cercano.

Metodológicamente, este análisis se realiza mediante regresión lineal y tal como se indica en la sección 3.2.1, la existencia de relación está definida por el valor p. Cuando el valor-p resulta mayor a 0,05, se acepta la hipótesis  $H_0$ , por lo cual no existe evidencia estadística que permita sustentar la relación entre las variables analizadas, por lo que se asigna que no podría existir relación estadísticamente significativa.

En los casos que se determina la existencia de una relación estadística (valor  $p < 0,05$ ), existen dos posibilidades para el análisis de la profundidad: Con sentido biológico y Sin sentido biológico.

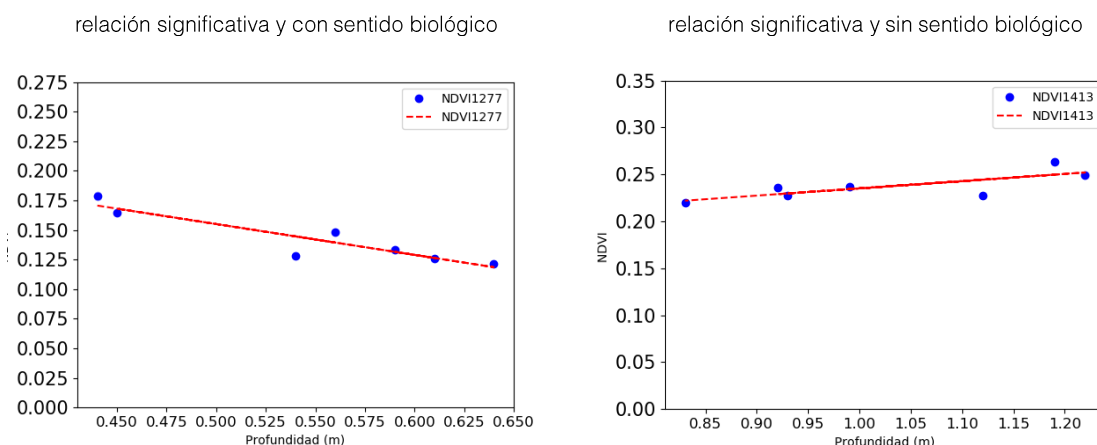
- a) Unidades con relación significativa y con sentido biológico: En el caso de la profundidad – NDVI corresponden a relaciones negativas, apreciándose que conforme aumenta la profundidad del nivel freático, la actividad vegetacional medida como NDVI disminuye, lo que estaría explicando estadísticamente la variación vegetativa.
- b) Unidades con relación significativa y sin sentido biológico: En el caso de la profundidad – NDVI corresponden a relaciones positivas. Se aprecia que la dispersión de los datos muestra que, conforme



aumenta la profundidad de la napa, aumentan los valores de cobertura, lo que sugiere que, en este caso, el nivel del agua no estaría explicando las coberturas.

Un ejemplo de las relaciones significativas con y sin sentido biológico es presentado a continuación:

**Figura 3-7. Ejemplo gráfico de relaciones profundidad-NDVI con y sin sentido biológico**



Con respecto a la información del nivel freático, las fuentes de los datos varía de acuerdo a cada periodo de análisis, la cual se detalla en la Tabla 3-3.

**Tabla 3-3. Fuentes de información de la profundidad de la napa por periodo de análisis.**

Años	Fuentes de información
(1998 – 2007)	- No se dispuso de datos de la profundidad de la napa de pozos en el Borde Este.
(2008 – 2012)	- Pozos de monitoreo en el marco del Plan de Seguimiento Hidrogeológico del Proyecto "Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama" (RCA N°226/2006).

Dado que para el periodo previo a la RCA N° 226/2006 (1998 – 2007) no se cuenta con datos de profundidad de la napa, no fue posible realizar estos análisis. Para subsanar este problema, los análisis NDVI – profundidad se analizaron, considerando los periodos con datos de profundidad, correspondiente al periodo 2008 – 2019.

### 3.3.2.2. Relación de la tendencia de la actividad vegetacional medida como NDVI con la precipitación

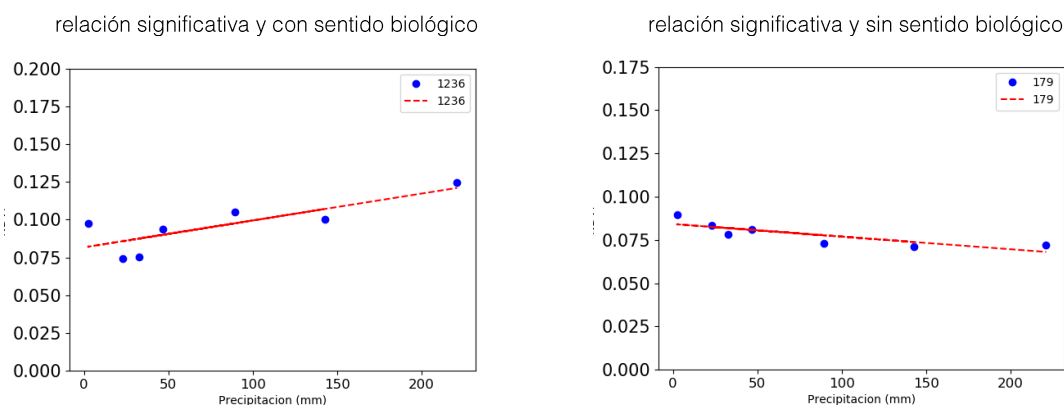
El objeto del análisis fue evaluar la influencia de precipitación en la dinámica de la vegetación de manera exploratoria, dado que, esta corresponde a una variable ambiental sobre la cual, se desconoce su nivel de influencia sobre los tipos vegetacionales presentes en el área de monitoreo del Borde Este del Salar de Atacama. A esto se agrega que, el proyecto no tiene injerencia ni control sobre esta variable. En consecuencia, en vista que el principal objetivo de este estudio es la detección de potenciales cambios (o deterioro) sobre la vegetación, este análisis se considera adicional y/o complementario. Para estos fines, se consideraron todas las unidades vegetacionales.

Metodológicamente, al igual que el análisis anterior, la relación precipitación – NDVI se realiza mediante regresión lineal y tal como se indica en la sección 3.2.1, la existencia de relación está definida por el valor p. Cuando el valor-p resulta mayor a 0,05, se acepta la hipótesis H0, por lo cual no existe evidencia estadística que permita sustentar la relación entre las variables analizadas, por lo que se asigna que no existe relación estadísticamente significativa.

En los casos que se determina la existencia de una relación estadística (valor  $p < 0,05$ ), existen dos posibilidades para el análisis de la profundidad: Con sentido biológico y Sin sentido biológico.

- a) Unidades con relación significativa y con sentido biológico: En el caso de la precipitación – NDVI corresponden a relaciones positivas, apreciándose que conforme aumenta la precipitación, la actividad vegetacional medida como NDVI aumenta, lo que estaría explicando estadísticamente la variación vegetativa.
- b) Unidades con relación significativa y sin sentido biológico: En el caso de la profundidad – NDVI corresponden a relaciones negativa. Se aprecia que la dispersión de los datos muestra que, conforme disminuyen las precipitaciones, aumentan los valores de cobertura, lo que sugiere que, en este caso, las precipitaciones no estarían explicando la dinámica de la vegetación.

Un ejemplo de las relaciones significativas con y sin sentido biológico es presentado a continuación:

**Figura 3-8. Ejemplo gráfico de relaciones precipitación-NDVI con y sin sentido biológico**

Como fuente de datos de la precipitación, se utilizaron los datos registrados en la estación Camar que cuenta con información para todo el periodo analizado y corresponde a la estación meteorológica más cercana al Borde Este. Además, esta estación presenta buenos ajustes con las estaciones meteorológicas aledañas, por lo que los registros se consideran representativos de las precipitaciones locales en el área.

## 4. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados de los análisis sobre la actividad vegetacional (NDVI) a partir de imágenes satelitales, aplicando las mejoras solicitadas por la Superintendencia de Medio Ambiente (SMA)<sup>1</sup>.

### 4.1. Análisis de tendencia de la actividad vegetal medida como NDVI

A continuación, se analiza la tendencia de la vegetación medida como NDVI, considerando el periodo completo (1998 – 2019), con la finalidad de observar de forma global la evolución de la vegetación en el tiempo.

Tal como se mencionó anteriormente, este análisis contempla el estudio de 2.204 unidades vegetacionales.

El análisis de tendencia permite identificar si aumentan, se mantiene o disminuye la actividad vegetacional en las unidades vegetacionales que componen el Borde Este del Salar de Atacama. Para fines prácticos, los resultados se expresan en superficie para cada tipo vegetacional y en una etapa preliminar se analiza el espectro de los valores NDVI en el Borde Este del Salar de Atacama.

#### 4.1.1. Descripción del espectro de valores de NDVI presentes en el Borde Este

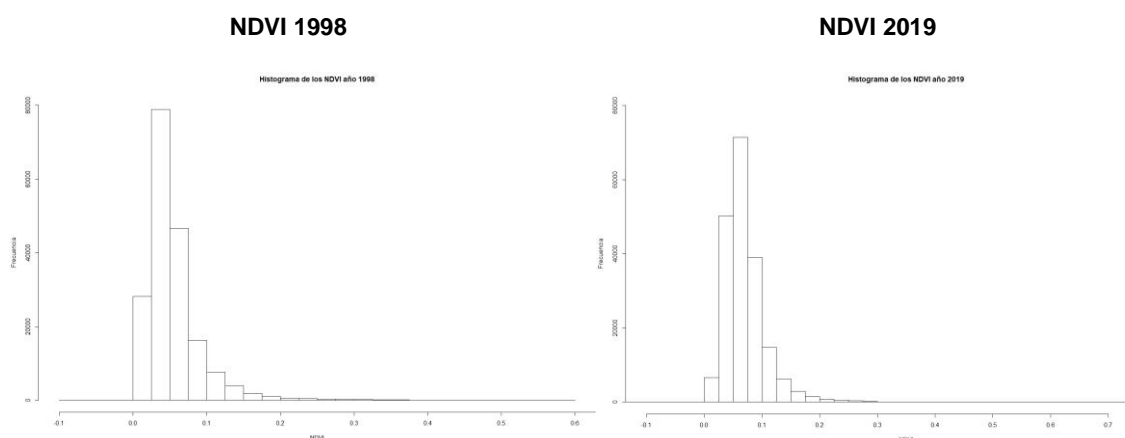
En el análisis de los píxeles del ráster de NDVI de abril 1998, obtenidos del procesamiento de imágenes satelitales Landsat Nivel 2, indica que en el área cubierta con vegetación el valor promedio de NDVI es de 0,052 con una desviación estándar de 0,0391. La máxima observada se aproxima a los 0,581. Pese a lo anterior, y tal como se observa en la Figura 4-1, los valores sobre 0,3 son escasos (dándose en tan solo seis polígonos).

<sup>1</sup> En el memorándum N°21068/2021 (SMA) y en la reunión técnica con SQM, celebrada de manera remota el lunes 13 de septiembre 2021.

Por otra parte, los valores de NDVI de abril 2019 no difieren a lo observado en el 1998, al mostrar una media de 0,068 y una desviación estándar de 0,03; mientras que la máxima alcanza un valor de 0,71. Al igual que para abril 1998, los valores son escasos sobre los 0,3 (llegando a cinco polígonos).

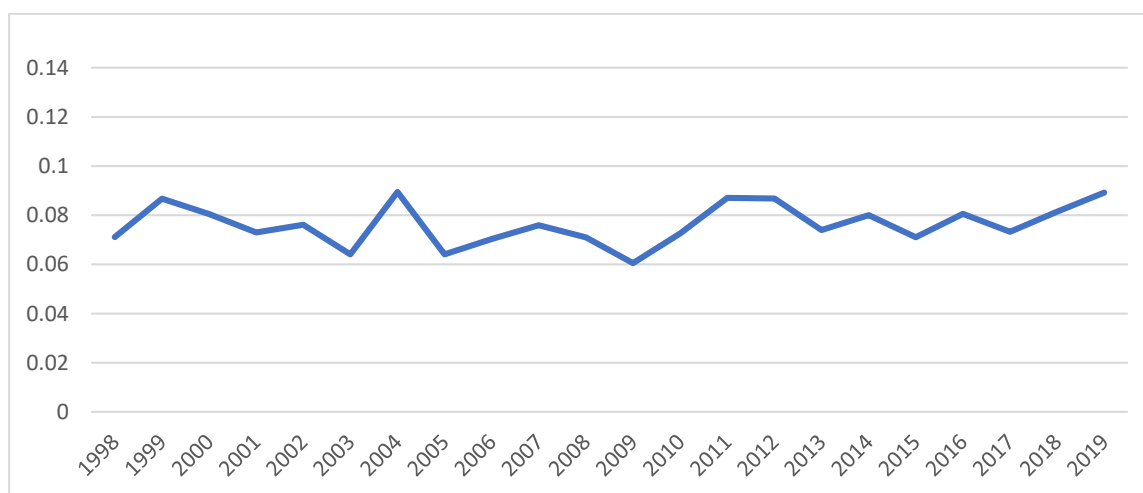
Conforme a lo anterior, se verifica que tanto la vegetación histórica como la actual en el Borde Este del Salar de Atacama, tiene baja cobertura y/o baja actividad fotosintética, lo que se condice con las condiciones de extrema aridez que dominan la zona de estudio.

**Figura 4-1. Distribución de frecuencia de pixeles de NDVI de abril en el área cubierta con vegetación del borde este del Salar de Atacama**



Los valores de NDVI promedio de toda la superficie con vegetación del Borde Este, se muestran relativamente estables y dentro de los rangos anteriormente señalados (**Figura 4-2**). No se aprecia una tendencia estadísticamente significativa dentro de todo el periodo de análisis (1998 – 2019).

**Figura 4-2. Promedio de los valores NDVI del área cubierta con vegetación en el Borde Este del Salar de Atacama en el periodo 1998 y 2019**

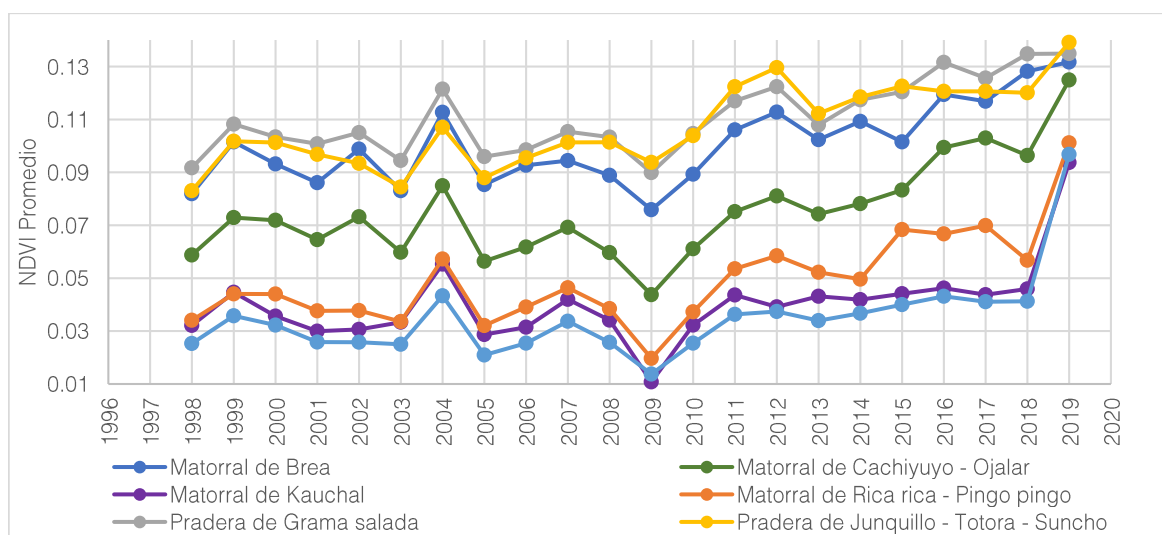


A continuación, se analiza cada una de las unidades vegetacionales (polígonos) que componen el Borde Este, mediante tendencias de la actividad vegetal medida como NDVI en el periodo de interés.

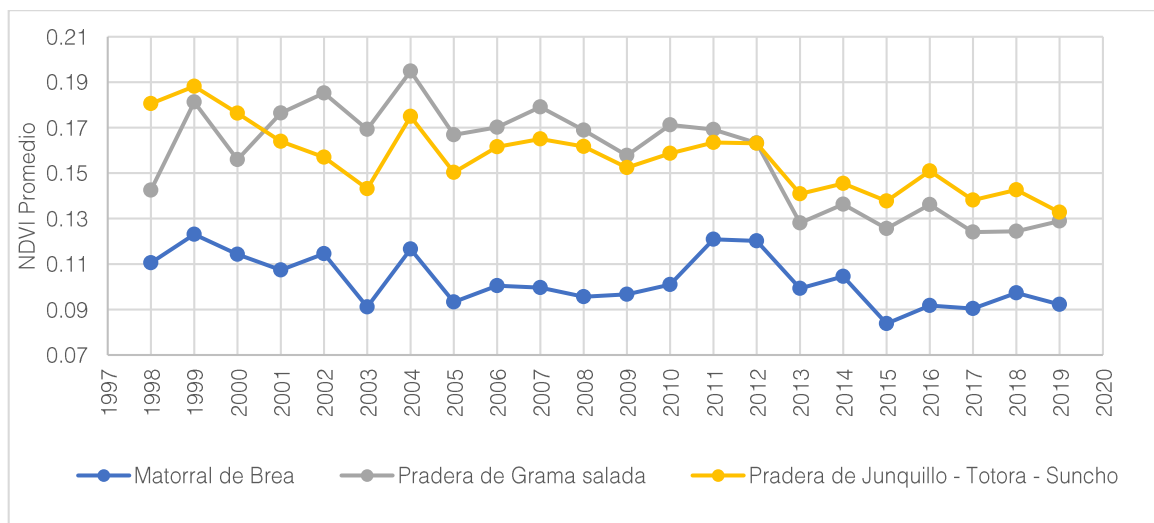
#### 4.1.2. Análisis de tendencia de los NDVI en el periodo completo (1998 – 2019)

Del análisis de tendencia en el Periodo completo (1998 – 2019) se observa que la mayor parte de las unidades con tendencia estadística lo hacen al alza de la actividad vegetal (valores NDVI más altos). En efecto, 1.441,44 ha (8,2% de la superficie total con vegetación) mostraron tendencias al alza. El aumento de la actividad vegetal se observa en todas las formaciones presentes en el Borde Este de Salar de Atacama. Mayoritariamente, las alzas se hacen presente en el matorral de Káuchal (524,52 ha), matorral de Brea (292,77 ha) y matorral de Cachiyuyo – Ojalar (240,03 ha), y en menor medida, en la pradera de Lukupa y pradera de Junquillo – Totora – Suncho (con 156,51 ha y 102,87 ha respectivamente).

**Figura 4-3. Valores promedios NDVI de unidades con tendencia al alza para cada tipo vegetacional en el Periodo completo (1998 – 2019)**



Mientras que 186,75 ha (1,1% de la superficie total con vegetación) mostraron tendencias a la baja (Tabla 4-1). De las 186,75 ha con tendencia a la baja, 113,76 ha corresponden a vegetación hidromorfa (pradera de Junquillo – totora – Suncho), 40,50 ha a matorral de Brea y 32,49 ha pradera de Grama salada (Tabla 4-1).

**Figura 4-4. Valores promedios NDVI de unidades con tendencia a la baja para cada tipo vegetacional en el Período completo (1998 – 2019)**

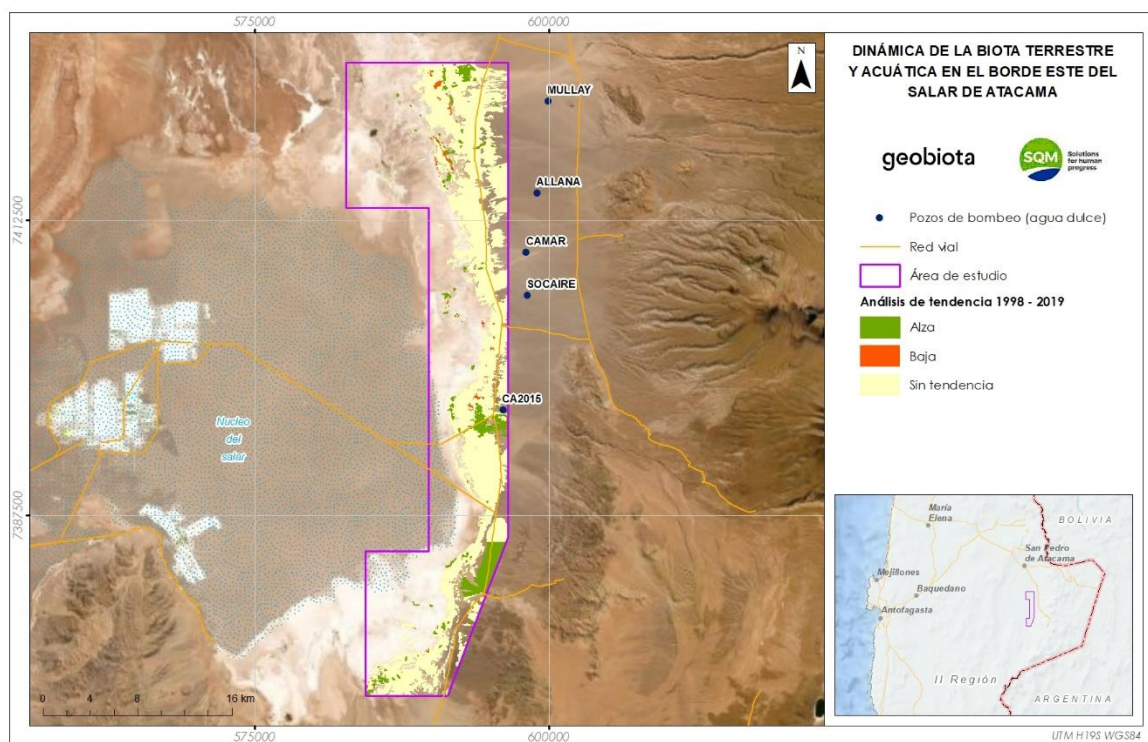
El detalle de las superficie con tendencias por tipo vegetacional se presenta en la Tabla 4-1

**Tabla 4-1. Superficie y participación porcentual de los tipos vegetacionales con tendencia en el Período completo (1998 – 2019)**

Tendencia	Tipo	Superficie (ha)	Participación (%)
Alza	Matorral de Brea	+292,77	1,7
	Matorral de Cachiuyo - Ojalar	+240,03	1,4
	Matorral de Káuchal	+524,52	3,0
	Matorral de Rica rica - Pingo pingo	+33,30	0,2
	Pradera de Grama salada	+91,44	0,5
	Pradera de Junquillo - Totorá - Suncho	+102,87	0,6
	Pradera de Lukupa	+156,51	0,9
Total alza		<b>+1.441,44</b>	<b>8,2</b>
Baja	Matorral de Brea	-40,50	0,2
	Pradera de Grama salada	-32,49	0,2
	Pradera de Junquillo - Totorá - Suncho	-113,76	0,7
Total baja		<b>-186,75</b>	<b>1,1</b>
Balance (Alza – Bajas)		<b>+1.254,69</b>	<b>7,2</b>
Total sin tendencia		<b>15.851,25</b>	<b>90,7</b>
Total general		<b>17.479,44</b>	<b>100,0</b>

De las 1.441,44 ha con tendencia al alza, 1.190,7 ha (82,6% del total con tendencia al alza) son explicados estadísticamente por las precipitaciones locales. De acuerdo con los análisis realizados en la sección 4.2.1. de forma desagregada, se estimó que el 100% de la superficie con tendencia al alza de la pradera de Lukupa y Káuchal presentó vínculo con las precipitaciones. Además, un 91% de la superficie de matorral de Cachiuyo - Ojalar con tendencia al alza también presentó relación con las precipitaciones (218,52 ha de 240,03 ha totales). Mientras que el 79,2% de la superficie de matorral de Rica rica – Pingo pingo, un 69% de la superficie de pradera de Grama salada y un 64,1% de pradera de Junquillo – Totorá – Suncho con tendencia al alza se relacionaron con las precipitaciones. Además, un 46,2% del matorral de Brea con tendencia del NDVI al alza, se relacionó también con las precipitaciones. Gran parte de las unidades vegetacionales con relación con la profundidad se distribuyen en conos aluviales (Figura 4-5).

**Figura 4-5. Distribución de área con tendencia en el Periodo completo (1998 – 2019)**





## 4.2. Relación de la vegetación medida como NDVI con la profundidad de la napa en el periodo completo (1998 – 2019)

A continuación, se examina la relación de la actividad vegetacional medida como NDVI según la profundidad de la napa, mediante regresión lineal considerando el periodo completo.

Tal como se indica en la metodología de estos análisis, las unidades sobre los cuales se aplicará la relación NDVI – profundidad corresponden a polígonos con tendencia a la baja, los que deben contar con información del nivel freático proveniente de un pozo de monitoreo asociado.

Dado que para el periodo previo a la RCA N° 226/2006 (1998 – 2007) no se cuenta con datos de profundidad de la napa, los análisis NDVI – profundidad se analizaron, considerando el periodo 2008 – 2019.

A partir de lo establecido en la sección 3.3.2.1, de este análisis se obtuvieron tres categorías de resultados:

- Unidades sin relación significativa
- Unidades con relación significativa y con sentido biológico
- Unidades con relación significativa y sin sentido biológico

### 4.2.1. Análisis de relación vegetación – profundidad en el periodo 2008 – 2019

Este análisis es posible de realizar solamente entre los años 2008 y 2019, debido a que en los años anteriores no existía una red de pozos de observación con los cuales vincular las variaciones de la vegetación con la profundidad de la napa.

Además, debido a que se obtuvo información rasterizada solamente entre los años 2010 a 2019 es que el análisis de relación en unidades con información de profundidad derivada de los ráster no se pudo realizar para este periodo.

#### A. Análisis de relación en unidades con tendencia a la baja

Se analiza la relación de la profundidad del nivel freático con la actividad vegetacional medida como NDVI en las unidades con tendencia a la baja en el periodo completo (2008 – 2019).

En este periodo se identificaron 40 unidades vegetacionales con tendencia a la baja, los que suman una superficie de 186,75 ha, lo que representa el 1,1% de la vegetación. Estas unidades se distribuyen principalmente en la sección de norte del Borde Este del Salar de Atacama (ver Figura 4-5).

De estas 40 unidades vegetacionales, 28 cuentan con información de profundidad de la napa, lo que representa el 70% de las unidades con tendencia a la baja. Las unidades relacionadas con la profundidad son las que se presentan en la Tabla 4-2, con su respectivo pozo de referencia.

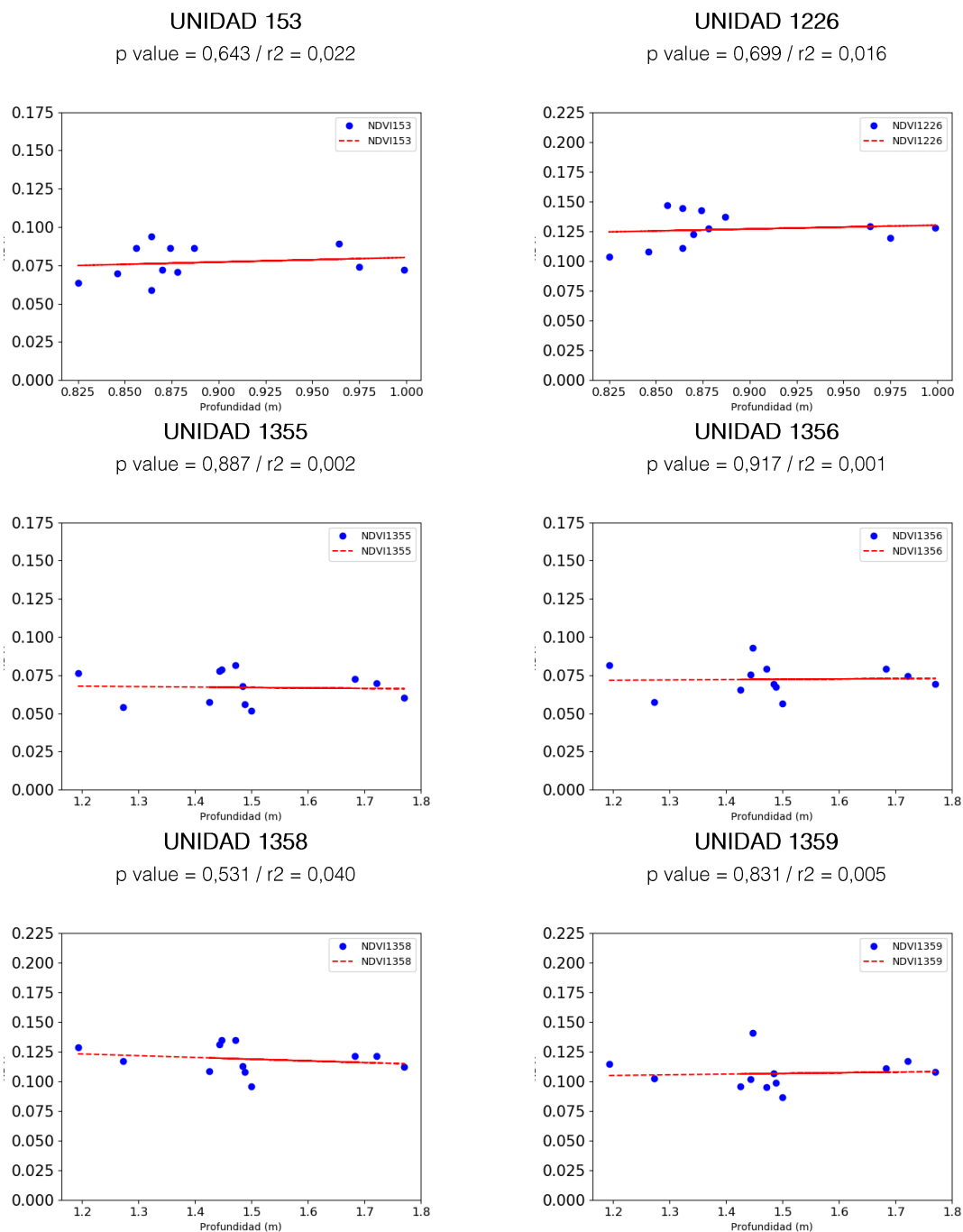


**Tabla 4-2. Unidades con tendencia a la baja y fuente de información de profundidad utilizado para establecer relaciones estadísticas**

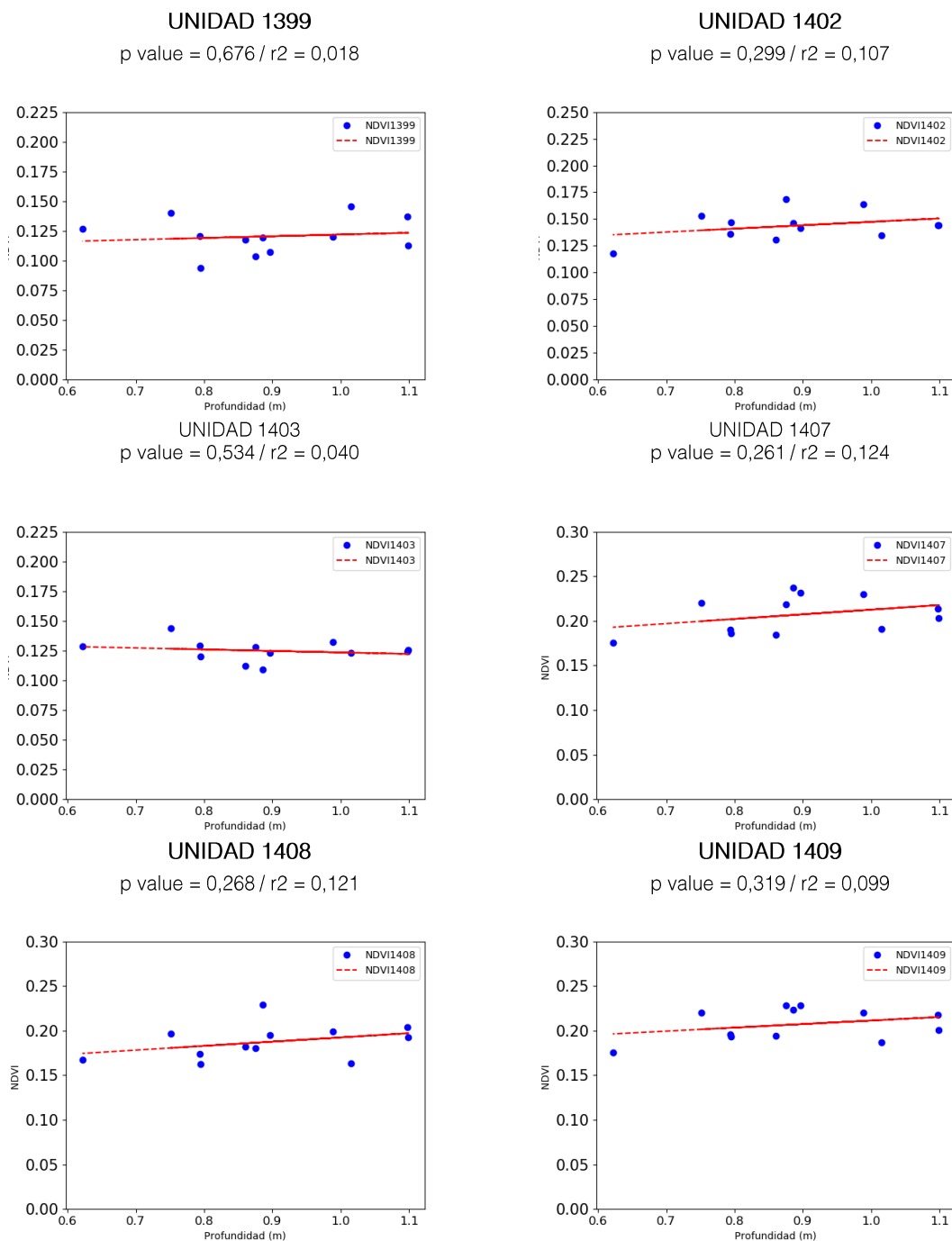
Unidad	Pozo	Unidad	Pozo	Unidad	Pozo
U153	1027	U1408	L1-17	U1708	L7-3
U1226	1027	U1409	L1-17	U1709	L2-8
U1355	L2-8	U1410	L1-17	U1710	L2-8
U1356	L2-8	U1412	L1-17	U1912	L1-17
U1358	L2-8	U1413	L1-17	U1920	L7-3
U1359	L2-8	U1415	L1-17	U1922	L7-3
U1399	L1-17	U1531	1027	U1923	L7-3
U1402	L1-17	U1681	L2-8	U1924	L7-3
U1403	L1-17	U1697	L1-17	-	-
U1407	L1-17	U1706	L7-3	-	-

Tal como se verifican en los gráficos de dispersión profundidad-NDVI presentados en la Figura 4-6, en todos los casos analizados no se verificó una relación estadísticamente significativa con la profundidad de la napa, por lo que los descensos de la actividad vegetacional no estarían explicados estadísticamente por la variación del nivel freático. Por lo tanto, se podría asumir que el proyecto “Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama” (RCA N°226/2006), no estaría relacionado con las menguas en la actividad vegetacional

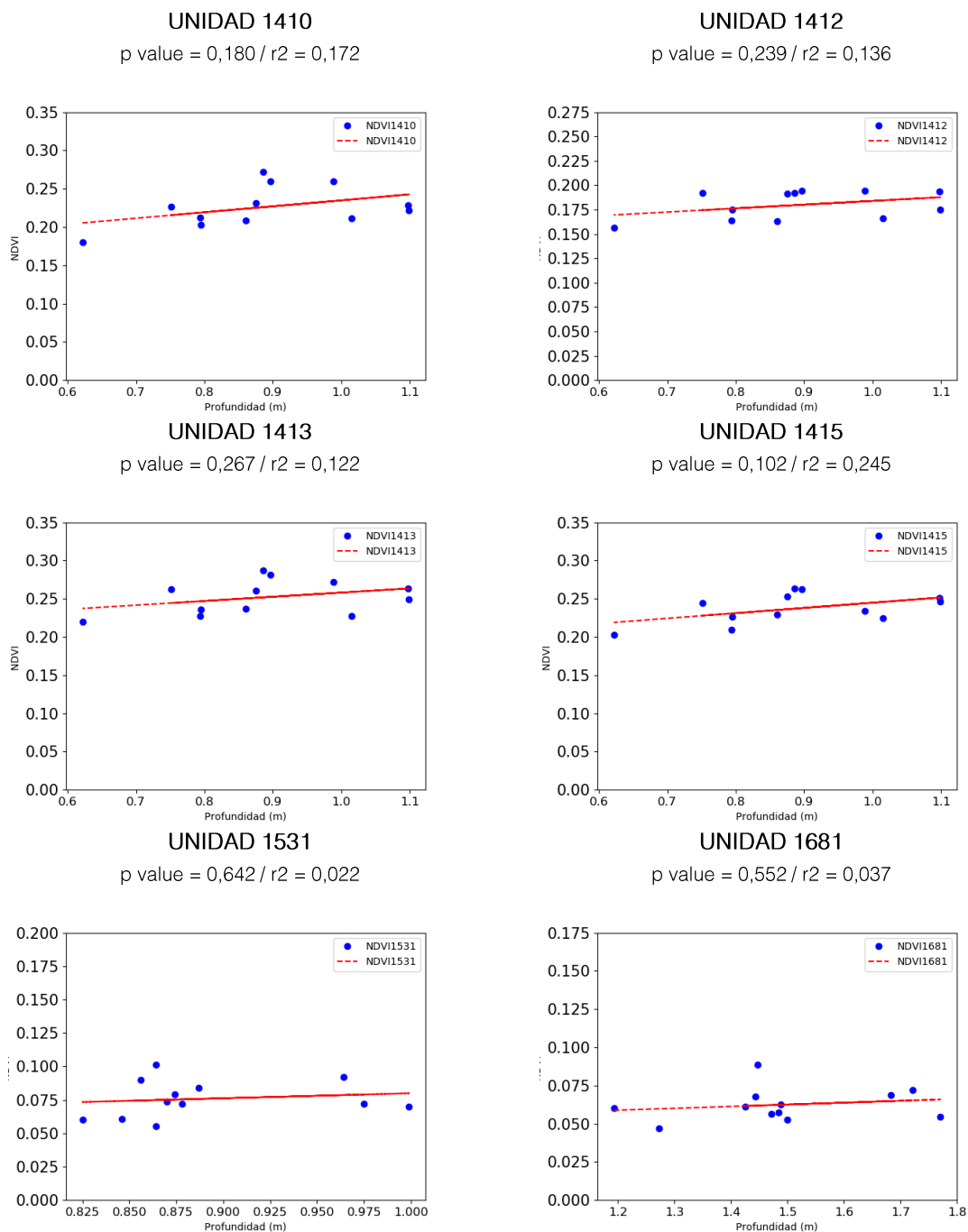
**Figura 4-6. Análisis de la relación NDVI – profundidad (m) en polígonos con tendencia a la baja en periodo completo (2008 – 2019)**



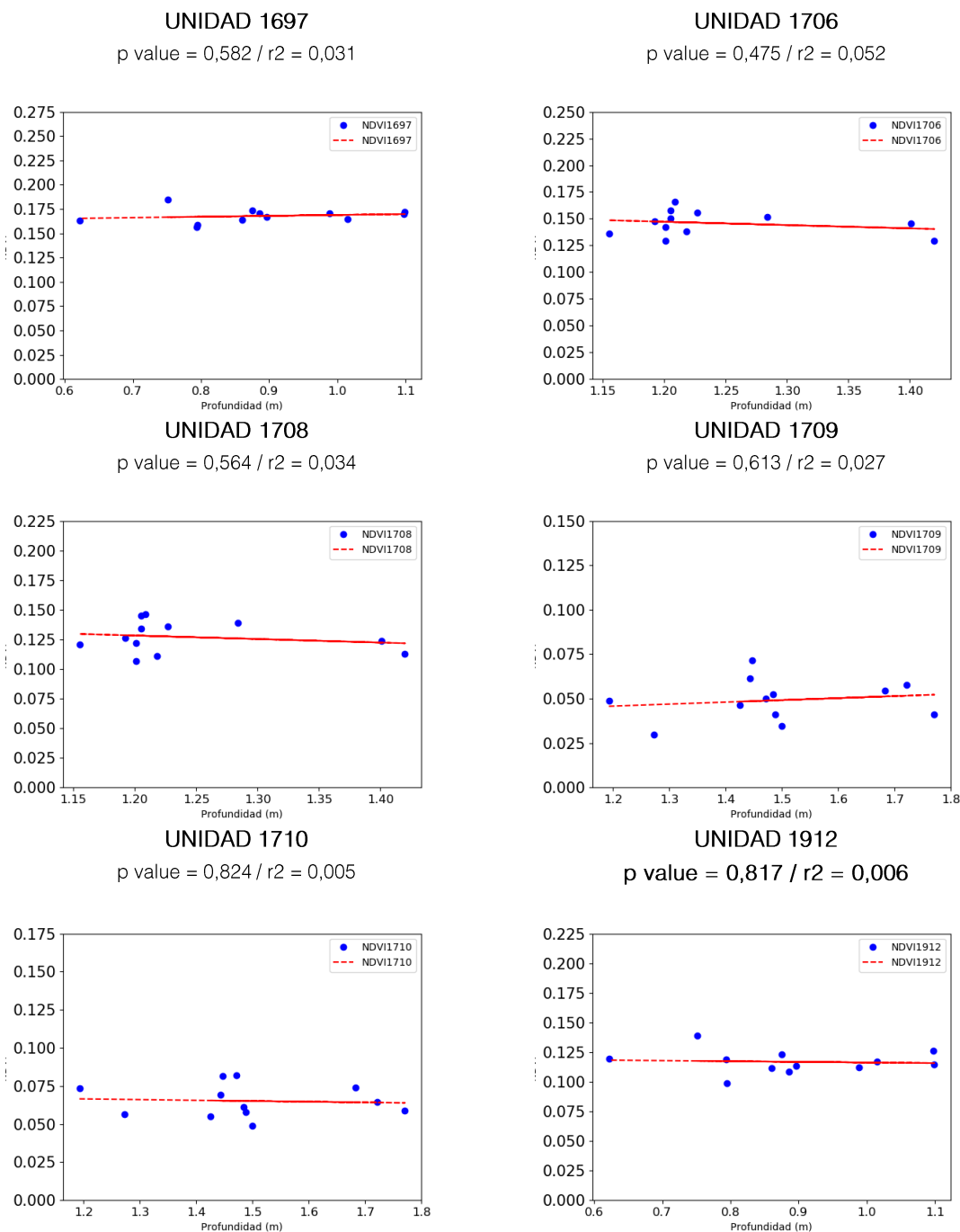
**Figura 4-6. Análisis de la relación NDVI – profundidad (m) en polígonos con tendencia a la baja en periodo completo (2008 – 2019)**



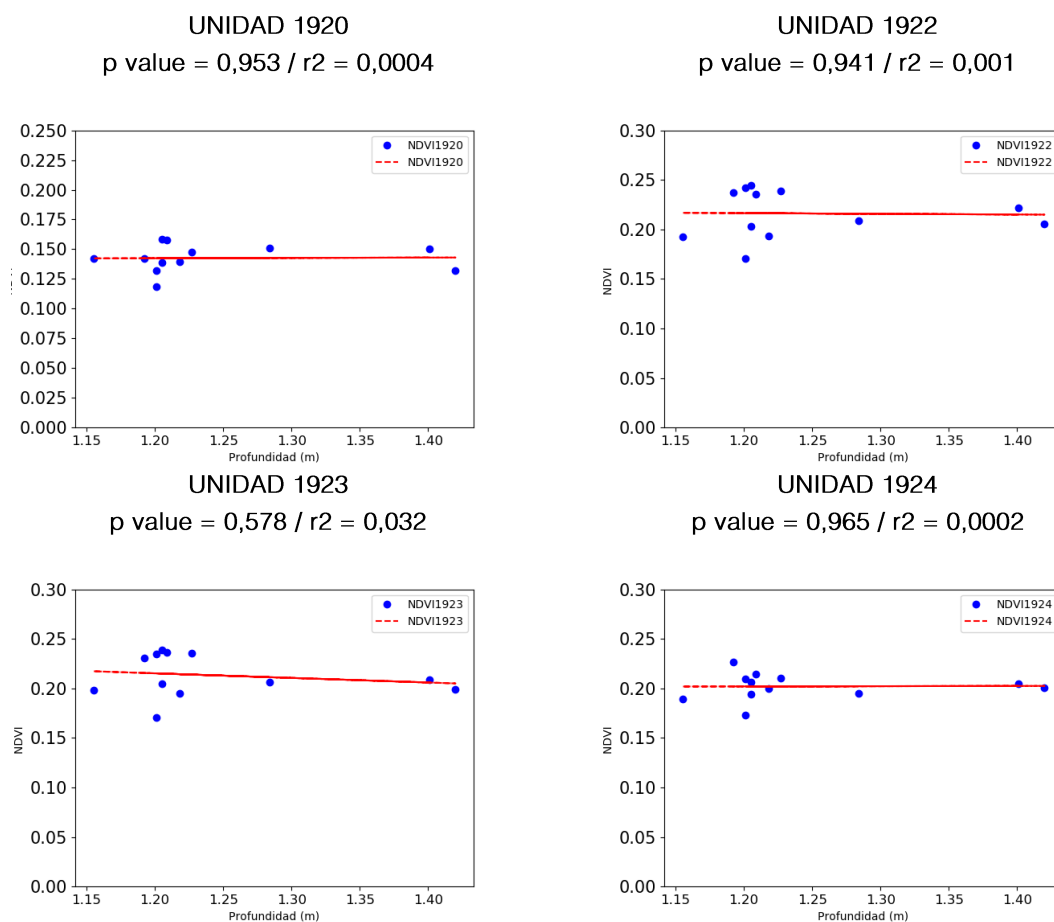
**Figura 4-6. Análisis de la relación NDVI – profundidad (m) en polígonos con tendencia a la baja en periodo completo (2008 – 2019)**



**Figura 4-6. Análisis de la relación NDVI – profundidad (m) en polígonos con tendencia a la baja en periodo completo (2008 – 2019)**



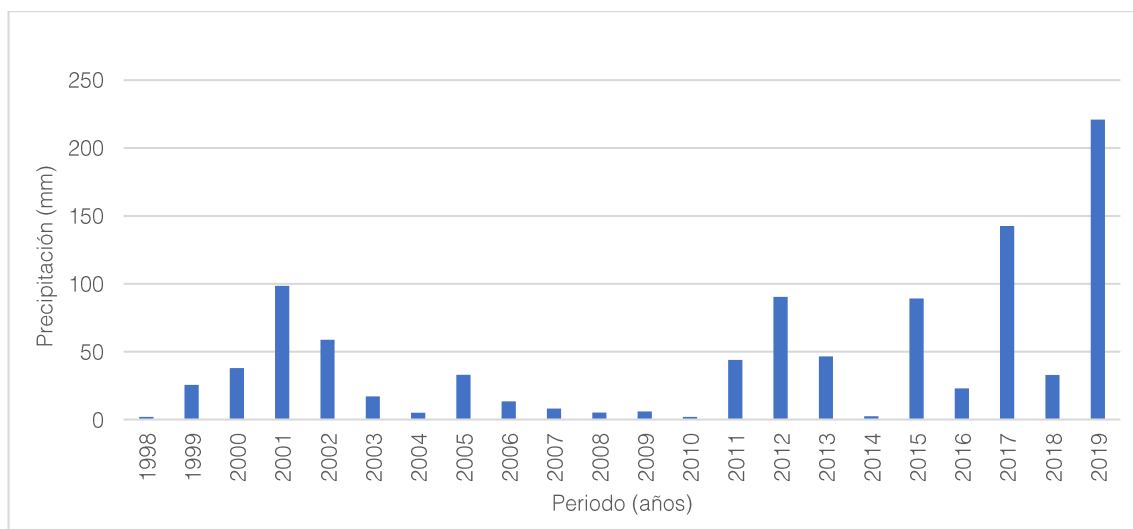
**Figura 4-6. Análisis de la relación NDVI – profundidad (m) en polígonos con tendencia a la baja en periodo completo (2008 – 2019)**



#### 4.3. Relación de la vegetación medida como NDVI con las precipitaciones locales

En esta sección se presentan los resultados del análisis que vincula la variación de los valores de la actividad vegetal medida como NDVI con la precipitación en cada una de las unidades vegetacionales existentes (registros estación meteorológica de Camar, ver Figura 4-7).

**Figura 4-7. Precipitación anual (mm) de la estación meteorológica Camar**



El análisis NDVI-precipitación considerando el periodo completo (1998 – 2019), reafirma los resultados del análisis por periodo presentado en el Apéndice 1.6 Refundido, al observarse una estrecha relación entre los pastos de lluvia (formaciones matorral de Káuchal y pradera de Lukupa) y las precipitaciones (ver Tabla 4-3), al verificarse que el 98,8% de la superficie cubierta con matorral de Káuchal (643,9 ha) y el 98,2% de la superficie de la pradera de Lukupa (2.523,7 ha) están relacionadas con las precipitaciones.

En menor medida, parte de la superficie de los matorrales Rica rica – Pingo pingo y Cachiyuyo – Ojalar presentaron relación con las precipitaciones, esto se constató en el 27,7% y 22,6% de la superficie cubierta por cada una de estas formaciones.

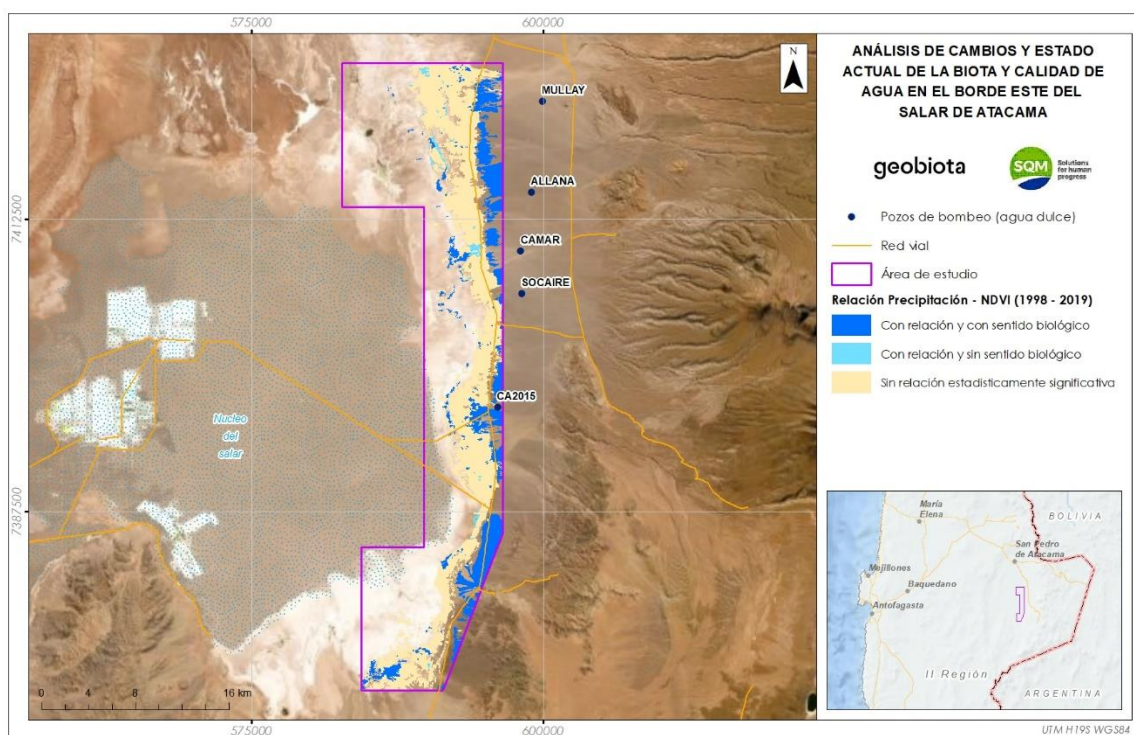
Por su parte, la pradera de Junquillo – Totor – Suncho, presenta un 18% de su superficie relacionada con las precipitaciones, lo que podría considerarse teóricamente anómalo, ya que esta formación vegetal se abastece de agua en suelos saturados o con acumulación de agua en la superficie.

Finalmente, las superficies del matorral de Brea y la Pradera de Grama salada, que se vinculan con las precipitaciones llegan al 9% y 5,8% del total de cada formación, por lo que se podría inferir que el régimen de precipitaciones no tendría una relación estrecha con estos tipos vegetacionales.

**Tabla 4-3. Superficie y porcentaje de los tipos vegetacionales relacionados con la precipitación local**

Tipos vegetacionales	Superficie total	Periodo completo (1998 – 2019)	
		Superficie (ha)	% del total
Matorral de Brea	8.026,4	464,2	5,8
Matorral de Cachiuyo - Ojalar	2.044,0	462,0	22,6
Matorral de Rica rica - Pingo pingo	552,5	152,9	27,7
Matorral de Káuchal	651,5	643,9	98,8
Pradera de Grama salada	2.199,8	197,9	9,0
Pradera de Junquillo - Totora - Suncho	1.434,3	257,8	18,0
Pradera de Lukupa	2.570,9	2.523,7	98,2
<b>Total</b>	<b>17.479,4</b>	<b>4.702,3</b>	<b>26,9</b>

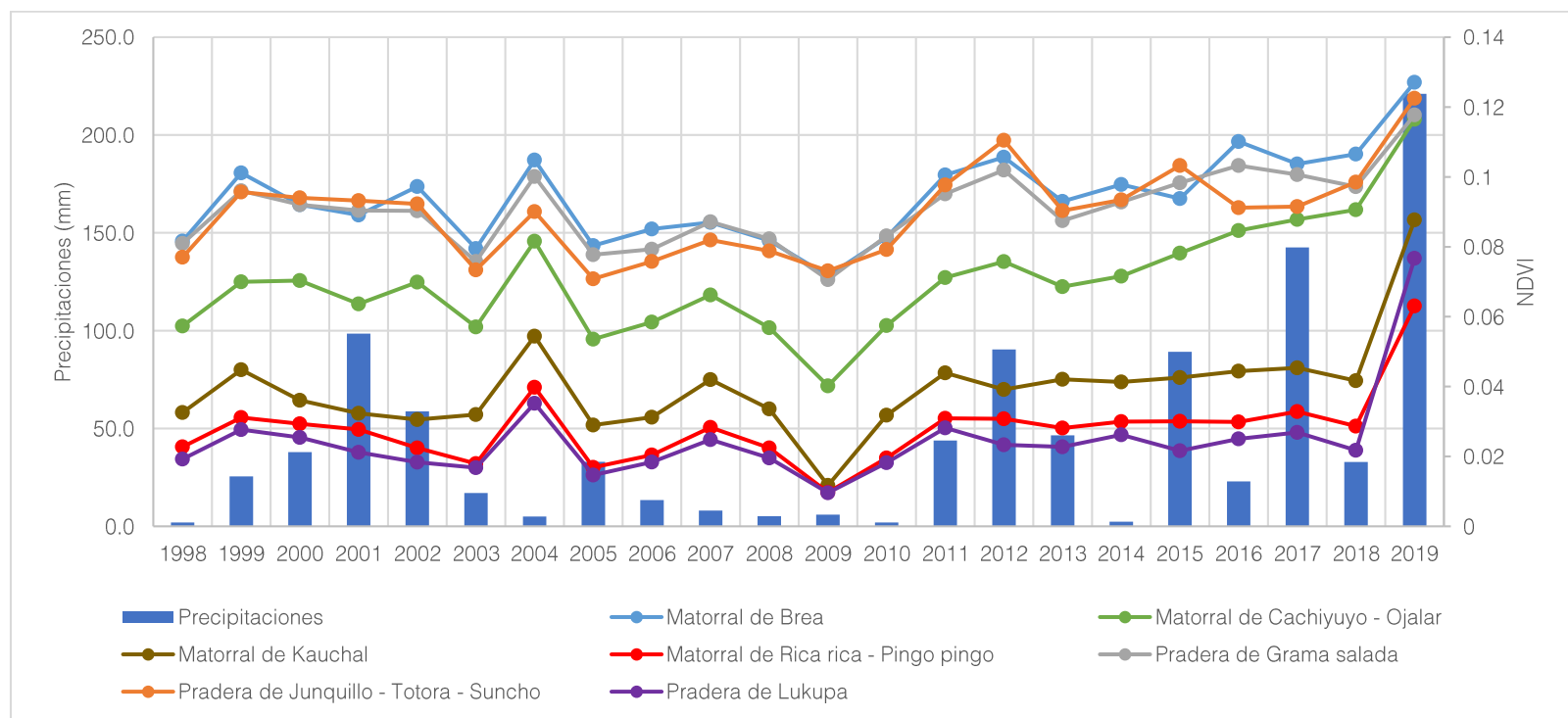
Las correlaciones entre la cobertura de la vegetación (NDVI) y las precipitaciones incorporaron a un SIG, mediante el cual fue posible identificar los sectores vinculados con las precipitaciones locales, los que se presentan en la Figura 4-8.

**Figura 4-8. Distribución de sectores relacionados con la precipitación local en el Periodo completo (1998 – 2019)**

Además, en la Figura 4-9 se presentan las variaciones del NDVI promedio y las precipitaciones anuales en las unidades identificadas con relación.



Figura 4-9. Variación los sectores con relación NDVI precipitaciones en el periodo completo (1998 – 2019)



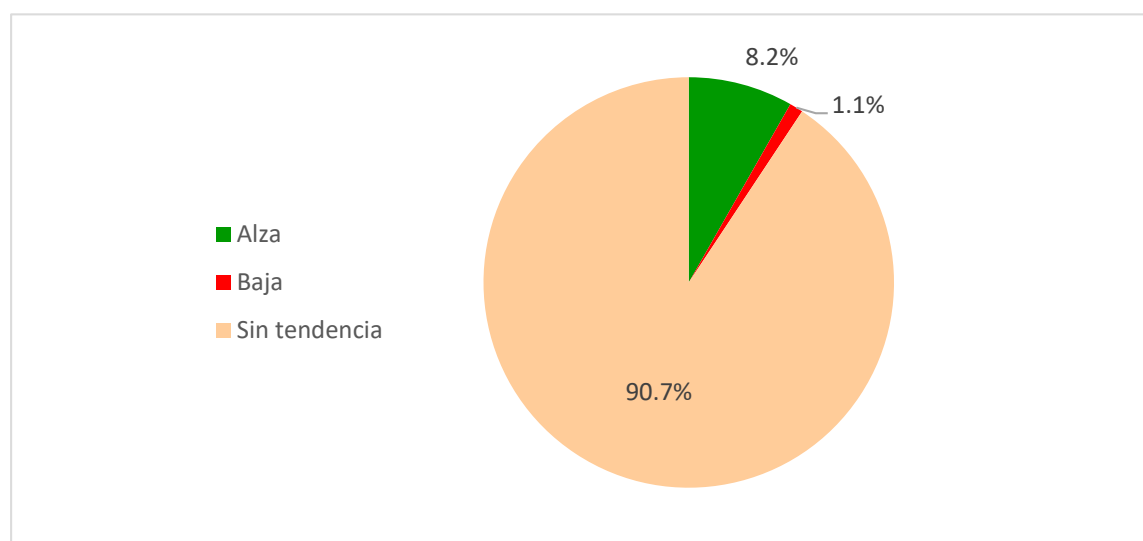
## 5. DISCUSIONES

### 5.1. Análisis de tendencia de la actividad vegetal medida como NDVI

Tal como se indica en los objetivos de este estudio, los resultados de este informe entregan antecedentes de la globalidad del sistema vegetacional del Borde Este del Salar de Atacama, en vista que analiza 22 años, compuestos por 10 años previos del proyecto “Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama (RCA 226/2006) y 12 años de operación de la citado Proyecto. Mientras que, lo presentado en el Apéndice 1.6 refundido (Sección 5.2 y 5.3) está enfocado en la determinación de la dinámica de la vegetación en periodos específicos, con el objetivo (entre otros) de identificar la dinámica de la vegetación previo a la RCA 226/2006 y la identificación el estado de la vegetación en el periodo con sobre extracción de Salmuera, para lo cual se analizó el periodo cuestionado (2013-2015) y el periodo cuestionado extendido (2013-2019).

El análisis de la actividad vegetacional en este estudio, el cual fue realizado a partir de imágenes satelitales Landsat SR Nivel 2, permitió identificar que la mayor proporción de la vegetación se encuentra estable, al no presentar tendencia estadísticamente significativa en el periodo completo (1998 – 2019). Al analizar las proporciones de las categorías de tendencia, el balance del estado de la vegetación es positivo, al verificarse que el 90,7% de la superficie se muestra estable (sin tendencia) y 1.441,44 ha muestran tendencia al alza (8,2% de la superficie) y sólo 1,1% de la superficie presenta a la baja.

Figura 5-1. Proporción de la superficie total con tendencias en el periodo 1998-2019



Dado que las superficies a la baja entre los periodos 1998-2007 alcanzó una superficie de 188,0 ha (sección 5.3.1.2 del Apéndice 1.6 refundido), cuyas magnitudes son prácticamente iguales a los identificados en el presente estudio (186,75 ha). Basado en lo anterior, es posible considerar que las variaciones de los 22 últimos años se encontrarían dentro de lo esperable o representa una condición normal del sistema, dado que el periodo 1998-2008 podría considerarse como un indicador de la dinámica natural de la vegetación del Salar de Atacama, al ser un periodo previo al proyecto “Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama (RCA 226/2006).

## 5.2. Relación de la vegetación con el agua

Diversos estudios desarrollados en zonas áridas de Chile y otras partes del mundo (Romo *et al.*, 1999, Pan *et al.*, 2008; Jarchow *et al.*, 2020) muestran relaciones significantes entre la vegetación (NDVI) y la profundidad de la napa o nivel del acuífero.

Por otra parte, conforme al modelo conceptual señalado para la vegetación del Borde Este, parte de la vegetación presente está directamente relacionada con la profundidad de la napa (vegetación herbácea hidromorfa y parte de matorrales arbustivos de Brea). Por ello, en este estudio se analizó si las variaciones observadas en NDVI se relacionan con las fluctuaciones registradas en el nivel del acuífero, en los periodos considerados.

Los resultados obtenidos permitieron verificar que, no existe correlación (estadísticamente significativa) entre la profundidad de la napa y la actividad vegetal medida como NDVI en los casos que se identificaron polígonos con actividad vegetacional con tendencia a la baja. Por ello, las reducciones en la actividad de la vegetación observadas e indicadas en el periodo analizado no podrían ser explicadas como consecuencia de variaciones en la profundidad de la napa y no podrían atribuirse al proyecto “Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama” (RCA N°226/2006).

Conforme a lo señalado, los cambios observados en la actividad de la vegetación (NDVI), son proporcionalmente menores a las áreas que se mantienen estables, y responderían a otras variables asociadas a la dinámica natural de la vegetación, donde podría tener incidencia el ciclo vital de las plantas y factores climáticas y ambientales imperantes (precipitación, temperatura, humedad ambiental, radiación, horas de luz y horas de frío), así como también, a factores antrópicos, que condicionan el establecimiento, crecimiento y mantención de las plantas. Estos factores, además de actuar simultáneamente sobre la vegetación, pueden presentar interacción entre ellos (Fortín y Dale, 2005).

La relación de la vegetación con otras variables, específicamente la influencia de la precipitación, fue posible verificarla mediante análisis de correlación. Es así como se identificó que, cada tipo vegetacional que componen el Borde Este del Salar de Atacama tiene vínculos variables con las precipitaciones. Basado en lo anterior, los análisis confirmaron la dependencia de los matorrales de Káuchal y la Pradera de Lukupa con las precipitaciones locales, lo que lleva a considerar estas formaciones como pastos de lluvia. Lo anterior es concordante con lo señalado por Romo *et al.* (1999) donde indica que estas especies responden a eventos inusuales de lluvia formando extensas “alfombras”.

Por otra parte, se observó que los matorrales de Rica rica – Pingo pingo y el matorral de Cachiyuyo-Ojalar mostraron incremento en su actividad vegetal (NDVI) como respuesta al aumento de las precipitaciones. Esto confirma lo planteado en el modelo conceptual de la vegetación del Borde Este, donde se reconoce que parte de la vegetación presente, recibe su aprovisionamiento de agua desde las precipitaciones. Esta vegetación se ubica en sectores donde la profundidad del nivel freático supera los 6 m, y dado que sus sistemas radiculares no logran alcanzar el suelo saturado a esas profundidades, su desarrollo dependería de las precipitaciones que recibe el lugar.

## 6. CONCLUSIONES

El presente informe analiza el comportamiento de la vegetación durante los años 1998 y 2019 en el Borde Este del Salar de Atacama. Se considera una superficie de 47.723,5 ha y un periodo de 22 años con información de imágenes Landsat SR nivel 2.

Las principales conclusiones derivadas del análisis efectuado indican lo siguiente.

### 1. Análisis de tendencia de la actividad vegetal medida como NDVI

El análisis para el periodo 1998 – 2019 realizado con imágenes Landsat nivel 2 con reflectividad en superficie muestran que el área sin tendencia al alza o baja en el tiempo predomina (90,7% de la superficie con vegetación). Mientras que un 8,2% de la superficie posee tendencia al alza y una superficie aún menor presenta una tendencia a la baja (1,1% del total).

### 2. Análisis de relación de la profundidad de la napa y la actividad vegetal medida como NDVI

Los análisis realizados mediante el uso de imágenes satelitales Landsat nivel 2 y la información profundidad derivada de Pozos de monitoreos (PSAH) en el periodo 2008-2019, se identificaron que la relación entre ambas variables resultó no ser significativa, evidenciando que el nivel freático no explicaría los cambios observados en la vegetación, por lo que no se verificarían efectos del proyecto "Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama" (RCA N°226/2006).

### 3. Análisis de relación de las precipitaciones locales y la actividad vegetal medida como NDVI

Se identificó que los efectos de la precipitación sobre la vegetación en el periodo 1998-2019 se producen principalmente en abanicos aluviales, quebradas y secciones más altas del borde este del Salar de Atacama, sectores donde la vegetación estaría desconectada del acuífero, lo que muestra consistencia con el modelo conceptual de la vegetación.

Se identificó una estrecha relación entre los pastos de lluvia (formaciones matorral de Káuchal y pradera de Lukupa) y las precipitaciones, al verificarse que el 98,8% de la superficie cubierta con matorral de Káuchal (643,9 ha) y el 98,2% de la superficie de la pradera de Lukupa (2.523,7 ha) están relacionadas con las precipitaciones.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, N., Galindo, G.; Fortanelli, J. y Contreras, C (2010). Índice normalizado de vegetación en caña de azúcar en la Huasteca Potosina. 18 pp.
- Chuvieco, E. (2002). Teledetección ambiental. Editorial ariel. 573 pp.
- Cohen, J. 1988. Statistical power analysis for the behavioral Sciences. Second Edition. New York. USA. 567p.
- Fortín, M.-J. y M-R.T. (2005). Spatial Analyst: a guide for ecologist. Cambridge University Press. 365p.
- Jarchow, C., William J. Waugh, Kamel Didan, Armando Barreto-Muñoz, Stefanie Herrmann y Pamela L. Nagler. 2020. Vegetation-groundwater dynamics at a former uranium mill site following invasion of a biocontrol agent: A time series analysis of Landsat normalized difference vegetation index data. Hydrological Processes. Vol. 34. pp.2739-2749.
- Li, D., D. Lu, M. Wu, X. Shao y J. Wei. (2018). Examining Land Cover and Greenness Dynamics in Hangzhou Bay in 1985–2016 Using Landsat Time-Series Data. Remote Sens. 10. 32. 22pp.
- C. L. Meneses-Tovar, (2011). El índice normalizado diferencial de la vegetación como indicador de la degradación del Bosque. UNASYLVA 238, VOL. 62, 2011/2
- Pan, S.B., Z.J. Wang, Q. X. Su, T. Sun y Y. Zhang. 2008. Groundwater level monitoring model using multi-temporal images in arid region of northwest China. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Pp.745-750
- Romo, M., V. Castro, C. Villagrán y C. Latorre. (1999). La transición entre las tradiciones de los oasis del desierto y de quebradas altas del Loa superior: Etnobotánica del Valle del Río Grande, 2da. Región Chile. Chungara, Revista de Antropología Chilena. Volumen 31, N° 2, pp. 319-360.
- RCA N°226 (2006). Resolución de calificación ambiental del proyecto cambios y mejoras de la operación minera en el Salar de Atacama (SQM Salar S.A.). Comisión regional del medio ambiente, Región de Antofagasta. 19 de octubre 2006.
- SMA (2020). Informe técnico: reporte humedal Tilopozo. 15 p.
- Soto, J, C Román-Figueroa & M Paneque (2019). NDVI A Model for Estimating the Vegetation Cover in the High-Altitude Wetlands of the Andes (HAWA). 17 p.
- N. Wilson & L. Norman (2018). Analysis of vegetation recovery surrounding a restored wetland using the normalized difference infrared index (NDII) and normalized difference vegetation index (NDVI). International Journal of Remote sensing. Vol. 39, No. 10, 3243-3274