



**INFORME ANUAL N°3**

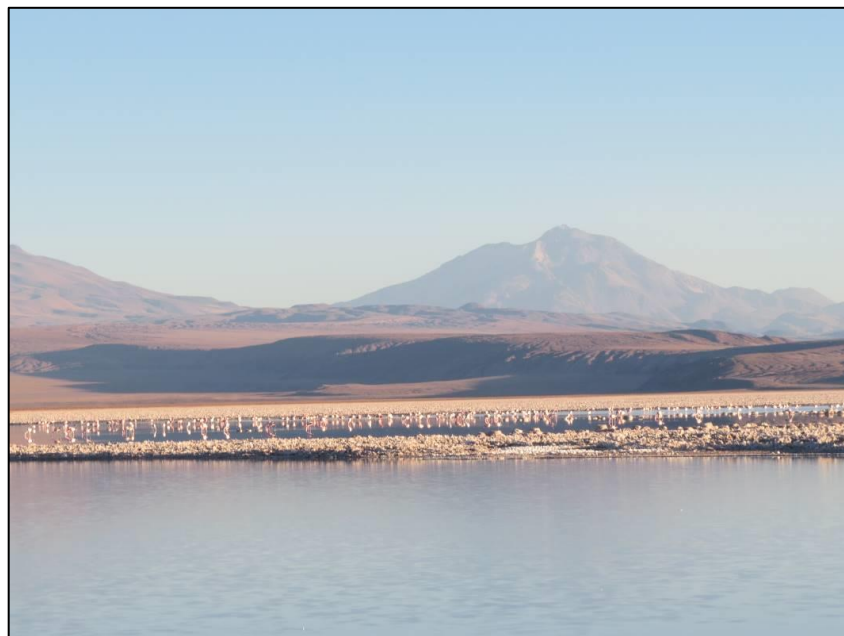
**Plan de Manejo Biótico**

**Proyecto “Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama (RCA RE N°21/2016)”**

**ANEXO I**

**Estado Ecológico del Sistema**

**ANÁLISIS DE TENDENCIAS EN VARIABLES DE SEGUIMIENTO DE VEGETACIÓN - AÑO N° 1, 2 y 3.**



**Región de Antofagasta**

**Agosto de 2019**

## TABLA DE CONTENIDOS

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>5</b>
<b>2. ANÁLISIS DE VEGETACIÓN Y FLORA EN TRANSECTAS .....</b>	<b>7</b>
2.1. Variación de la cobertura vegetal en transectas .....	7
2.2. Análisis de la estructura comunitaria (composición de especies) .....	8
2.3. Variación de la salinidad en transectas .....	16
<b>3. ANÁLISIS DE LA COBERTURA ACTIVA .....</b>	<b>21</b>
3.1. Comparación de la cobertura activa con línea de base .....	21
3.2. Análisis de recurrencia de la cobertura activa .....	22
3.3. Comparación del NDVI Landsat con línea de base .....	29
3.4. Comparación de la tendencia interanual del NDVI Landsat .....	30
3.4.1. Obtención de registros NDVI Landsat.....	31
3.4.2. Evaluación estadística de tendencias .....	33
3.5. Análisis de correlaciones con el NDVI .....	34
3.5.1. Validación del NDVI con las coberturas en transectas.....	35
3.5.2. Relación del NDVI con variables hidroclimáticas .....	37
<b>4. REFERENCIAS .....</b>	<b>40</b>

## TABLAS

Tabla N° 2-1. Relación de sitios de muestreo de la componente suelos con transectas de vegetación, para evaluación de la condición del sustrato salino durante los monitoreos del proyecto.....	17
Tabla N° 2-2. Coeficientes de correlación lineal entre parámetros de evaluación del sustrato salino: Coberturas de afloramiento salino y vegetal (Cs y Cv) medidas en transectas de vegetación, con Salinidad y Conductividad Eléctrica tomados por la componente suelo según las formaciones azonales en seguimiento del sector Tilopozo – La Punta y La Brava. ....	19
Tabla N° 2-3. Coeficientes de correlación lineal entre parámetros de evaluación del sustrato salino: Coberturas de afloramiento salino y vegetal (Cs y Cv) medidas en transectas de vegetación, con Salinidad y Conductividad Eléctrica tomados por la componente suelo según las formaciones azonales en seguimiento del sector Peine. ....	21
Tabla N° 3-1. Registros históricos de superficies de vegetación activa obtenidos con el NDVI de imágenes de alta resolución. ....	22

---

Tabla N°3-2. Homologación de formaciones vegetales de seguimiento, según monitoreos de Transectas y COT- NDVI .....	24
Tabla N° 3-3. Superficies y porcentajes de cobertura de vegetación activa según nivel de recurrencia entre el Año 1 (2017) y Año 3 (2019) obtenidos con el NDVI de imágenes satelitales de alta resolución para monitoreos anuales de verano en las formaciones en seguimiento por subsector Tilopozo y La Punta-La Brava. ....	26
Tabla N° 3-4. Superficies y porcentajes de cobertura de vegetación activa según nivel de recurrencia entre el Año 1 (2017) y Año 3 (2019) obtenidos con el NDVI de imágenes satelitales de alta resolución para monitoreos anuales de verano en las formaciones de seguimiento en el sector Peine.....	29
Tabla N° 3-5. Registros históricos del NDVI de probabilidad de excedencia de 75% propuestos para monitoreo de vegetación con imágenes Landsat de media resolución. ....	30
Tabla N°3-6. Características de los sensores utilizados en el análisis NDVI.....	31
Tabla N°3-7. Tamaño muestral de registros del NDVI Landsat 2009-2019, determinado por estratos según nivel de recurrencia de la cobertura vegetal activa obtenida desde el NDVI de imágenes de alta resolución de los monitoreos de verano 2017-2019.....	33
Tabla N°3-8. Coeficientes de correlación lineal del NDVI promedio por estación, obtenidos desde imágenes Landsat 2009-2019 con la precipitación anual (estación meteorológica Peine) en formaciones de herbazales y matorrales monitoreadas. ....	39

## FIGURAS

---

Figura N° 2-1. Comparación de la cobertura absoluta de vegetación por tipo de formación y estación.....	8
Figura N° 2-2. Variación porcentual de la cobertura vegetal de las especies dominantes en las formaciones del sector Tilopozo y La Punta y La Brava, de los monitoreos iniciales (MB0-M1; invierno 2016) con respecto al periodo total de monitoreo (M2 a M6).....	12
Figura N° 2-3. Variación porcentual de la cobertura vegetal de las especies acompañantes en las formaciones del sector Tilopozo y La Punta y La Brava, de los monitoreos iniciales (MB0-M1; invierno 2016) con respecto al periodo total de monitoreo (M2 a M6).....	13

---

Figura N° 2-4. Variación porcentual de la cobertura vegetal de las especies dominantes y acompañantes en las formaciones del sector Peine, de los monitoreos iniciales (MB0-M1; invierno 2016) con respecto al periodo total de monitoreo (M2 a M6).....	15
Figura N° 3-1. Proceso metodológico de determinación del nivel de recurrencia de la cobertura de vegetación activa obtenida con el NDVI de imágenes de alta resolución para el periodo de verano (post-lluvia) 2017-2019. ....	25
Figura N° 3-2. Evaluación de la recurrencia de la cobertura vegetal activa en las formaciones de monitoreo, obtenida con el NDVI de imágenes de alta resolución en monitoreos anuales de verano 2017-2019 en los subsectores de Tilopozo y La Punta- La Brava. ....	27
Figura N° 3-3. Evaluación de la recurrencia de la cobertura vegetal activa en las formaciones de monitoreo, obtenida con el NDVI de imágenes de alta resolución en monitoreos anuales de verano 2017-2019 en el sector Peine. ....	29
Figura N° 3-4. Correlaciones lineales entre el NDVI (obtenidos de imágenes de Alta Resolución- AR <i>izquierda</i> y Landsat - <i>derecha</i> ) y las coberturas vegetales en transectas de los tipos de vegetación de monitoreo (2016-2019): herbazales ( <i>arriba</i> ) y matorrales ( <i>abajo</i> ).....	36
Figura N° 3-5. Correlación multitemporal del NDVI Landsat promedio con variables hidroclimáticas (anuales en mm): precipitación, evaporación y balance precipitación-evaporación. ....	38

## ANÁLISIS DE TENDENCIAS EN VARIABLES DE SEGUIMIENTO DE VEGETACIÓN - AÑO N° 1,2 y 3.

### 1. INTRODUCCIÓN

El presente documento corresponde a uno de los Anexos del Capítulo 12.8 del Informe Anual N°3, con la descripción de metodologías y análisis de tendencias de la **Vegetación**, incluyendo seguimiento del año 1, 2 y 3, comprometida en el Plan de Manejo Biótico (PMB, Anexo 2 de la Adenda 5 y Apéndice B - Anexo 2 Adenda 5 del proyecto). Esta componente corresponde a una de los tres indicadores de estado para el análisis del Estado Ecológico del Sistema.

Los análisis que se describen a continuación, se subdividen según los dos indicadores establecidos para esta variable de estado:

**(1) Transectos de Vegetación:** Para análisis de estado en la vegetación, el primer indicador que quedó establecido es la de transectos de vegetación, entendiendo como un cambio de tendencia lo siguiente: *“si después de 3 años consecutivos (periodos) se observa una disminución sostenida de la cobertura de especies, aumento de sustrato salino (medición obtenida en el monitoreo de suelo) o cambios en la estructura comunitaria (composición de especies)”*.

Por lo anterior, el análisis de tendencias se realiza sobre los tres años de seguimiento (2016-2017-2018) en relación a registros de transectas del Monitoreo Base (MB0) realizado en invierno (julio 2016), la cual corresponde a la línea de base para esta variable de estado, en los siguientes aspectos:

- Variación de la cobertura vegetal en transectas.
- Análisis de la estructura comunitaria (composición de especies).
- Variación de la salinidad en transectas.

**(2) Coberturas de Vegetación Activa:** análisis multitemporal de la vegetación activa, en las formaciones azonales sujetas a seguimiento, para ello se realiza lo siguiente:

- Comparación con los registros de línea de base de la cobertura vegetal activa obtenida con el NDVI de imágenes alta resolución de verano 2017-2019.
- Análisis del nivel de recurrencia<sup>1</sup> de la cobertura activa, obtenida con el índice NDVI de imágenes de alta resolución durante el periodo 2017-2019, también

<sup>1</sup> **Nivel de recurrencia** se refiere al número de superposiciones de una misma condición de análisis, es decir, la presencia en seguimientos sucesivos, en este caso de la cobertura vegetal activa obtenida desde el índice NDVI para los años de monitoreo 2017-2019.

---

complementario a lo exigido por el PMB, para determinar las áreas de superposición resultantes, que representan el nivel variabilidad o estabilidad espacial de la actividad vegetal en las formaciones de seguimiento.

- Comparación con línea de base del NDVI de imágenes Landsat con probabilidad de excedencia de 75%, de manera complementaria a lo exigido al PMB, pero que permite detectar si el sistema presenta una vigorosidad relativamente baja respecto a su comportamiento histórico.
- Comparación de la tendencia del NDVI de imágenes Landsat para el periodo pre-operacional (2009-2016) y operacional (2016-2019), este análisis complementario se realizó con el propósito de analizar un periodo de estudio superior al de seguimiento del proyecto (tres años) y poder evaluar con veracidad estadística los cambios de estado en la componente.
- Análisis de relaciones del NDVI con variables de interés, el cual se realiza de forma complementaria a lo exigido por el PMB, con el fin de reducir la incertidumbre asociada en los factores posibles que indiquen el estado de la componente y robustecer la discusión de los resultados obtenidos en las transectas y la cobertura activa. Para esto, las variables consideradas en la correlación con el NDVI, fueron la cobertura de vegetación obtenida en las transectas y variables hidroclimáticas.

## 2. ANÁLISIS DE VEGETACIÓN Y FLORA EN TRANSECTAS

### 2.1. Variación de la cobertura vegetal en transectas

Este análisis consiste en la evolución por sector, de la cobertura promedio de la vegetación, junto a las coberturas del rastrojo, la cobertura de otros recubrimientos y la riqueza en los monitoreos de los primeros tres años de seguimiento, en referencia al Monitoreo “0” realizado en Julio de 2016 (MB0).

Seguidamente, se analiza la evolución de las coberturas de vegetación absolutas por transecta de monitoreo, para determinar las variaciones en los tres años de monitoreo (2016-2019) en referencia al MB0.

Los resultados y discusión obtenidos por sector y transectas se presentan directamente en el **Capítulo 12.8 - Estado Ecológico del Sistema, secciones 1.2.1.1.a. para el Sistema La Punta – La Brava y 1.2.2.1.1.a para el Sistema Peine.**

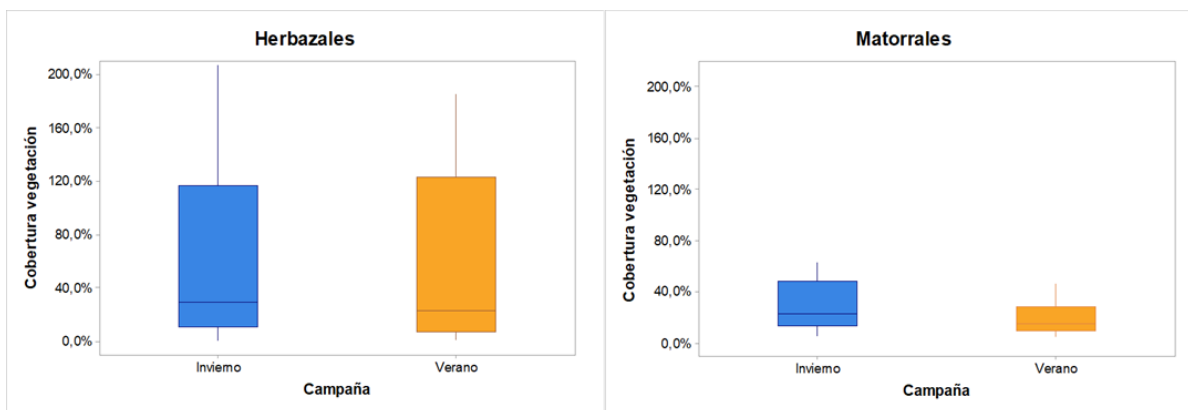
De forma complementaria a lo exigido por el PMB, se realiza un análisis general sobre la **estacionalidad en los tipos de formaciones de seguimiento**, con la finalidad de determinar un posible comportamiento de las variaciones en la cobertura vegetal de las transectas, se analiza la variación estacional de la cobertura vegetal entre los tipos de formaciones en seguimiento (herbazales/vegas con matorrales).

Para este análisis se utilizaron diagramas de caja (*boxplot*)<sup>2</sup>, con las coberturas absolutas de las transectas en cada estación (invierno y verano, post-lluvia) y por tipo de formación de seguimiento en los sectores de interés. Como se observa en la **Figura N° 2-1**, las coberturas absolutas de vegetación registradas en los herbazales tienen un mayor rango de variación entre las transectas de estudio, aunque entre estación (invierno-verano), éste tiene poca diferencia comparado con las formaciones de matorral. En los herbazales, el rango de las coberturas en las campañas de invierno es entre 11,1 y 117,1% y de 7,1 y 123,7%, en verano; mientras que en los matorrales, las coberturas se concentran entre 13,8 y 48,0% en invierno, y descienden a un rango entre 9,7 y 28,5% en verano. Además, como se observa para ambas estaciones, existe una alta variación entre coberturas mínimas y máximas, donde el 50% de las coberturas absolutas registradas se presentan bajo un 29,1% en invierno y bajo un 22,5% en verano.

Comparando entre estaciones, las coberturas de los herbazales varían menos entre monitoreos; mientras que los matorrales, presentan una mayor variación de las coberturas registradas en invierno, a diferencia de los monitoreos de verano, donde las coberturas tienen una menor dispersión (**Figura N° 2-1**).

<sup>2</sup> Diagramas de caja- box-plot: Es un método estandarizado para representar gráficamente una serie de datos numéricos a través de sus cuartiles. De esta manera, el diagrama de caja muestra la mediana y los cuartiles de los datos, pudiendo también representar los valores atípicos.

**Figura N° 2-1. Comparación de la cobertura absoluta de vegetación por tipo de formación y estación.**



Fuente: Elaboración propia.

## 2.2. Análisis de la estructura comunitaria (composición de especies)

Para evaluar un cambio en el estado ecológico, se consideró lo indicado por el PMB establecido según Anexo 2 de la Adenda 5 del proyecto, respecto a evaluar entre otros parámetros en la vegetación: *una disminución sostenida de la cobertura de especies o cambios en la estructura comunitaria.*

El análisis de estos parámetros, se realiza a partir de la **variación de la cobertura vegetal de las especies y la variación en la composición de las especies** en referencia al número de intercepciones en la transecta (frecuencia), para determinar cambios en la estructura comunitaria de la vegetación azonal.

Respecto a la **variación de la cobertura vegetal de las especies**, se realiza por sector considerando la evolución de estas coberturas en dos escalas de análisis:

- El promedio anual de las coberturas de las especies por formación vegetal y se relaciona con el promedio de las coberturas del periodo inicial asociado a la condición basal del proyecto, correspondiente a MB0. Esta relación, nos permite observar si las variaciones en el tiempo son sostenidas a través de los tres años de seguimiento o bien se enmarcan en una variabilidad interanual.
- La variación de la cobertura de las especies por transecta, determinada por la diferencia porcentual de las coberturas absolutas por transecta entre el promedio del primer semestre de monitoreo, dado que ambos muestreos presentaban un mes de diferencia (julio y agosto 2016, MB0/M1), con respecto al promedio de los monitoreos del período total de seguimiento (M2 a M6; 2017-2019), además de analizar su importancia estadística con un nivel de significancia del 0,05.



Para determinar estadísticamente si las variaciones de cobertura por transectas son significativas, es decir, si la variación de las coberturas presentaría una validez estadística al relacionar las variaciones de las coberturas durante el periodo de seguimiento, se los utilizaron los valores promedio anuales para cada especie (M1-M2/M3-M4/M5-M6) y se compararon con MB0 y M1. Para esto se realizó la prueba estadística Kruskal-Wallis donde el valor del parámetro F de este test, se acompaña del valor  $p$  para cuantificar estadísticamente la importancia de la variación. Los niveles de significancia (denotado como  $\alpha$  o alfa) usados fueron de 0,05. Un  $\alpha$  menor o igual a 0,05 indica, con un riesgo del 5%, que existe una variación significativa entre las variables analizadas.

Respecto a **la variación en la composición de las especies**, se determina la variación de la composición de especies a través de su frecuencia, a partir de los registros de especies en las transectas evaluando su posición, es decir el n° de intercepciones de cada especie en la transecta. La transecta que es de 50 metros lineales, lo que consiste en 500 intercepciones posibles, se divide en tres tramos: los extremos con menor cantidad de intercepciones (Tramo 1 y 3) y el centro de la transecta que representa la mayor cantidad de intercepciones (Tramo 2).

- Tramo 1: 0-10 m, que representa 100 intercepciones posibles
- Tramo 2: 10,1 – 40 m. que representa 300 intercepciones posibles, y
- Tramo 3: 40,1 – 50 m, que representa 100 intercepciones posibles.

En esta división por tramos, se suman los registros (frecuencia) de cada especie por tramo y de todas las transectas asociadas a una formación vegetal en un sector determinado, y en cada monitoreo. A partir de estos datos, se obtiene el promedio del N° de intercepciones de cada especie en los monitoreos, pudiendo comparar la evolución de estos registros con el registro inicial de MB0 (monitoreo basal en invierno 2016).

Seguidamente, para determinar si las variaciones de cobertura de las especies son significativas, es decir, si la variación de las coberturas presentaría una validez estadística al relacionar ambos periodos, se realizó la prueba estadística Kruskal-Wallis donde el valor del parámetro F de este test, se acompaña del valor  $p$  para cuantificar estadísticamente la importancia de la variación. Los niveles de significancia (denotado como  $\alpha$  o alfa) usados fueron de 0,05. Un  $\alpha$  menor o igual a 0,05 indica, con un riesgo del 5%, que existe una variación significativa entre las variables analizadas.

La evaluación de cambios en el estado ecológico, se realizó de acuerdo a lo señalado en el PMB, que señala “se entenderá como un cambio en tendencia según la evaluación realizada después de 3 años consecutivos (periodos), respecto su comportamiento previo de línea de base o registros históricos”. De acuerdo a esto, se analizó la variación de la composición de las especies a través de su posición, medida a través del número de intercepciones de cada especie en las transectas. Esta variación se realiza a través del promedio de intercepciones por especie y por tramo, comparando los valores promedio de cada monitoreo con los registros de MB0. Además, para determinar aquellos cambios con variaciones significativas, considerando un  $\alpha$  menor o igual a 0,05, se determinaron las variaciones de cada especie por transecta.

Los resultados y discusión obtenidos por sector de: el promedio anual de las coberturas de las especies y la variación en la composición de las especies, se presentan directamente en el **Capítulo 12.8 - Estado Ecológico del Sistema, secciones 1.2.1.1.1.b. para el Sistema La Punta – La Brava y 1.2.2.1.1.b para el Sistema Peine.**

Respecto al **análisis estadístico de la variación de las coberturas vegetales** de las especies por transecta en los tres años de seguimiento, en relación a la cobertura basal de invierno 2016 (MB0-M1) se presentan a continuación los resultados y discusión por sector:

#### a) Sistema La Punta - La Brava

En el subsector Tilopozo, localizado al Noroeste dentro del sistema La Punta- La Brava, en **Figura N° 2-2** y **Figura N° 2-3 izquierda**, se observan las variaciones de las coberturas para las especies dominantes y acompañantes, respectivamente. **Entre las especies dominantes** el rango de variación es de  $\pm 100\%$ , con algunas diferencias significativas (estadísticamente):

- Aumento de *D. spicata* en la transecta T21 de Tilopozo, con una variación del 75%.
- Aumento de *S. californicus* en T22, ya que el 100% de su variación es porque no se registraba en MB0 y M1 y en los siguientes monitoreos aparece con una baja cobertura absoluta (<5%).
- Descenso de *J. balticus* y *D. spicata* en T18 y T22, las cuales solo se registraron en MB0 y M1 aunque con una cobertura absoluta menor al 5% en ambos casos.

**Entre las especies acompañantes**, las variaciones tienen un rango entre -47% a 63% y un aumento con significancia estadística de *Lycium humile* en T30, el cual se debe a que en M1 no se registra y en MB0 su cobertura es muy baja, resaltando así el aumento de cobertura en los siguientes monitoreos aunque no sobrepasa el 5% de cobertura absoluta en los tres años de seguimiento (ver detalles en **Anexo I de Vegetación y Flora**).

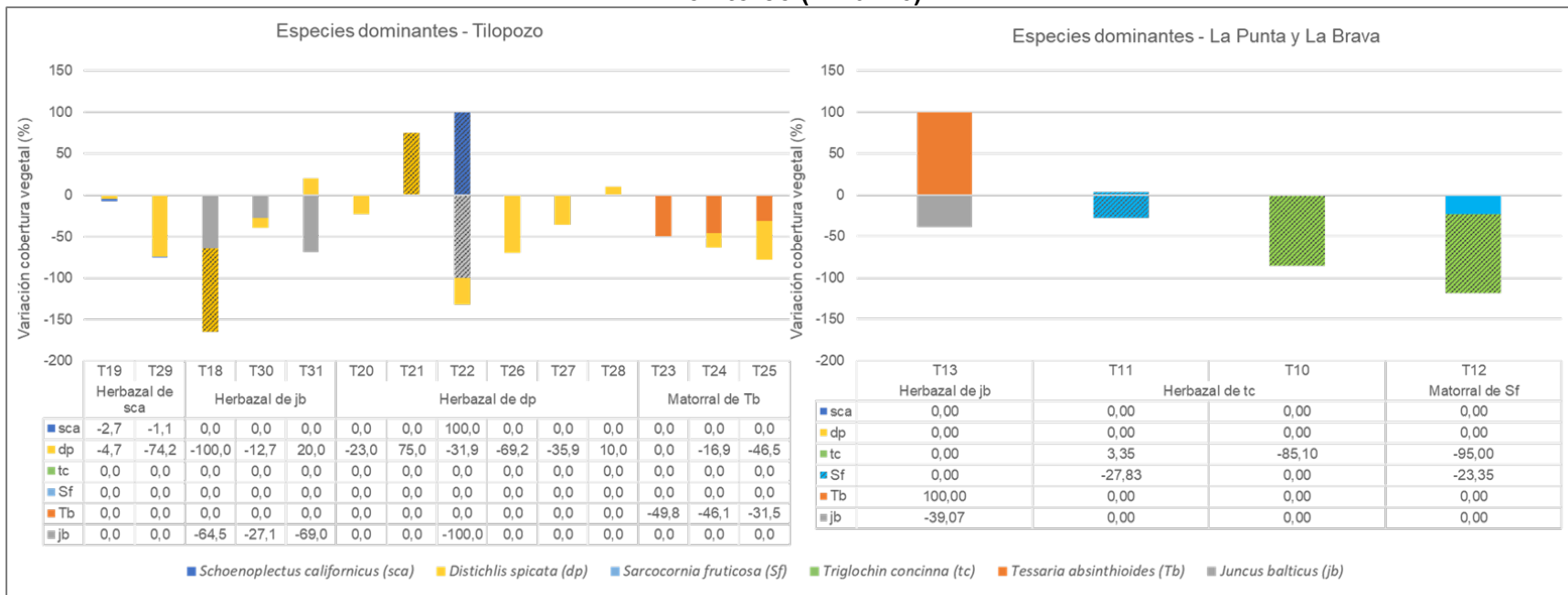
---

**En el subsector La Punta- La Brava (Figura N° 2-2 y Figura N° 2-3 derecha), entre las especies dominantes el rango de variación va desde -100% a 95%, con las siguientes diferencias significativas (estadísticamente):**

- La especie *T. concinna* en T10 y en T12 con descensos del 85% y 95% respectivamente, debido una disminución paulatina en la formación de la T10 y la desaparición de la su presencia desde M3 en la T12.
- La especie *S. fruticosa* en T11, disminuye en 28% probablemente por un descenso paulatino, aunque no representa las mayores variaciones.

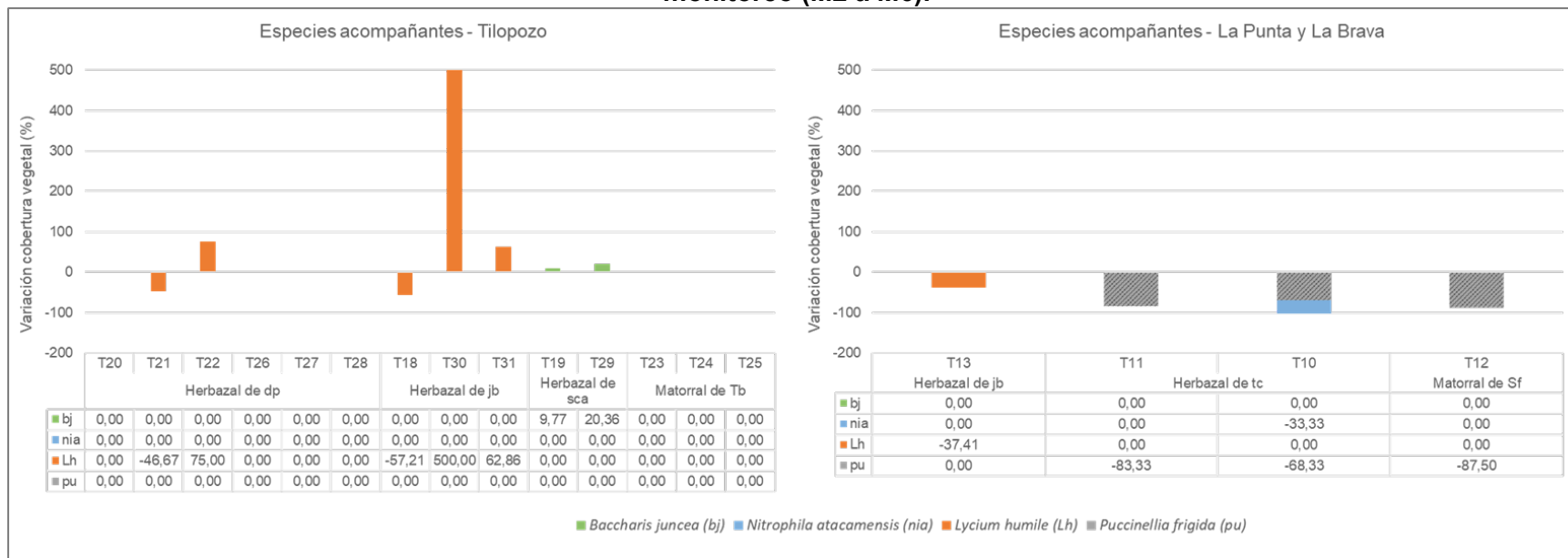
**Entre las especies acompañantes del subsector, *Puccinellia frigida* registra variaciones significativas al descenso en las tres transectas, probablemente por la baja cobertura que presenta (<5% cobertura absoluta), acentuándose cualquier descenso en su caso.**

**Figura N° 2-2. Variación porcentual de la cobertura vegetal de las especies dominantes en las formaciones del sector Tilopozo y La Punta y La Brava, de los monitoreos iniciales (MB0-M1; invierno 2016) con respecto al periodo total de monitoreo (M2 a M6).**



Donde: Achurado en columnas representan variaciones significativas considerando un valor de  $p < 0,05$ , correspondientes a: dp-T18; dp-T21, jb-T22, sca-T22, Sf-T11, tc-T10, tc-T12.  
 Fuente: Elaboración propia.

**Figura N° 2-3. Variación porcentual de la cobertura vegetal de las especies acompañantes en las formaciones del sector Tilopozo y La Punta y La Brava, de los monitoreos iniciales (MB0-M1; invierno 2016) con respecto al periodo total de monitoreo (M2 a M6).**



Donde: Achurado en columnas representan variaciones significativas considerando un valor de  $p < 0,05$ , correspondientes a: pu-T11, pu-T10, pu-T12.

Fuente: Elaboración propia.

---

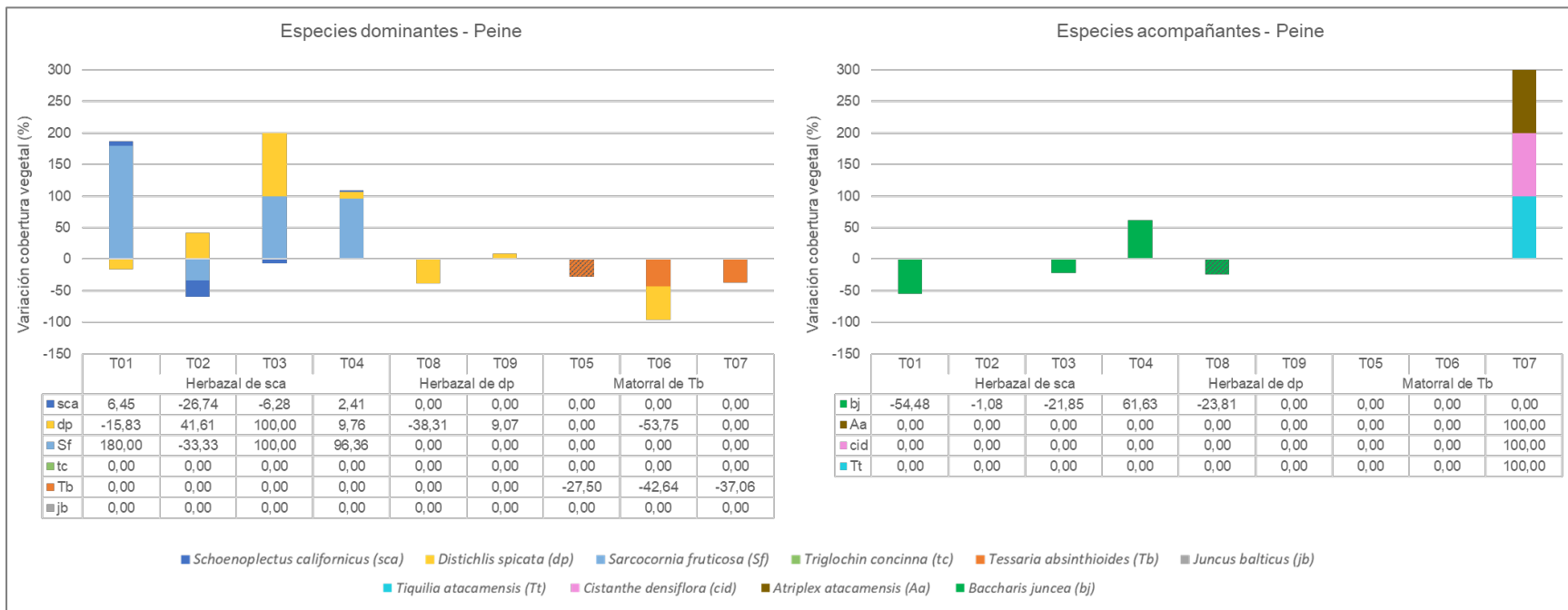
**b) Sistema Peine**

En este sector, la variación de las coberturas de las especies por transecta registra una amplia variabilidad con un rango entre -100% a 200% entre las dominantes y de -54% a 100% entre las acompañantes (**Figura N° 2-4**).

**Entre las especies dominantes**, se observan varios aumentos principalmente en las transectas del herbazal de *S. californicus* y una diferencia significativa de *T. absinthioides*, con descenso del 27,5% en la transecta T05 (**Figura N° 2-4 izquierda**).

**Entre las especies acompañantes**, se observa una disminución significativa (estadísticamente) de 23,8%, para la especie *B. juncea* en T08, esto probablemente por un descenso sostenido, aunque es una especie que presenta una baja cobertura en la formación, en todos los monitoreos <5% de cobertura absoluta (**Figura N° 2-4 derecha**; detalles en **Anexo I de Vegetación y Flora**).

**Figura N° 2-4. Variación porcentual de la cobertura vegetal de las especies dominantes y acompañantes en las formaciones del sector Peine, de los monitoreos iniciales (MB0-M1; invierno 2016) con respecto al periodo total de monitoreo (M2 a M6).**



Donde: Achurado en columnas representan variaciones significativas considerando un valor de  $p < 0,05$ , correspondientes a: Tb-T05; bj-T08.

Fuente: Elaboración propia.

### 2.3. Variación de la salinidad en transectas

Para evaluar un cambio en el estado ecológico, se consideró lo indicado por el PMB establecido según Anexo 2 de la Adenda 5 del proyecto, respecto a evaluar entre otros parámetros de los transectos de vegetación: *un aumento de sustrato salino (medición adquirida en el monitoreo de suelo).*

La evaluación de la condición del estado ecológico en el sustrato salino, se realiza por sector en consideración a lo señalado en el PMB, referente a que *“se establece como criterio de mantención del estado ecológico, que las variables de estado se mantengan dentro del registro de línea de base, esto es que los valores medidos anualmente en promedio, se mantengan en el rango de los valores registrados históricamente por sector.”*

Al respecto, se evaluó este punto en específico del PMB. Para esto, en cada transecta se promediaron las coberturas salinas por año de monitoreo, es decir el Año 1 corresponde al promedio registrado en M1 y M2; Año 2 a M3 y M4 y Año 3 a M5 y M6. Estos valores se compararon con el valor del primer registro existente (M1), considerado con la condición histórica correspondiente el inicio de operaciones del proyecto.

La evaluación de cambios en el estado ecológico, se realizó de acuerdo a lo señalado en el PMB, que señala *“se entenderá como un cambio en tendencia según la evaluación realizada después de 3 años consecutivos (periodos), respecto su comportamiento previo de línea de base o registros históricos”*. De acuerdo a esto, se comparó el M1 con los valores promedio anuales y se determinaron aquellos cambios con variaciones de  $\pm 10\%$  en la cobertura salina durante los 3 años de monitoreo.

De forma complementaria a lo exigido por el PMB y con el objetivo de conocer la relación de los factores posibles que inciden en el estado del sustrato salino, se relacionaron los parámetros de las coberturas salina y vegetal (transectas) con la concentración salina del suelo (componente suelo).

Para esto, se relacionaron espacialmente los valores obtenidos de la cobertura de afloramientos salinos y de la cobertura vegetal durante los monitoreos M1 a M6 en aquellas transectas cercanas y en la misma unidad muestral, a calicatas de monitoreo de la componente suelo, a partir de los registros de los parámetros Salinidad y Conductividad Eléctrica (ambos medidos en el componente suelos). La **Tabla N° 2-1** registra los 14 sitios evaluados en los sectores de estudio.



**Tabla N° 2-1. Relación de sitios de muestreo de la componente suelos con transectas de vegetación, para evaluación de la condición del sustrato salino durante los monitoreos del proyecto.**

Sector	Subsector	Formación vegetal	Códigos de muestreo		DISTANCIA ENTRE SITIOS DE MUESTRO (m)
			Punto Suelo	Transecta Vegetación	
Peine		<i>Herbazal de Distichlis spicata</i>	S-14	T09	130
			S-10	T28	100
		<i>Herbazal de Schoenoplectus californicus</i>	S-11	T04	10
			S-12	T07	30
Tilopozo – La Punta y La Brava	La Brava	<i>Herbazal de Triglochin concinna</i>	S-6	T10	100
	La Punta	<i>Herbazal de Juncus balticus</i>	S-3	T13	25
			S-5	T11	50
			S-4	T12	25
	Tilopozo	<i>Herbazal de Distichlis spicata</i>	S-07	T20	10
			S-09	T21	20
			S-2	T26	20
			S-1	T27	15
			S-08	T19/T29	30
			<i>Matorral de Tessaria absinthioides</i>	S-13	T24

Fuente: Elaboración propia.

Las correlaciones lineales entre variables, se determinaron con los coeficientes de Pearson (paramétrico) y Rho Spearman (no paramétrico) para examinar la fuerza y la dirección de la relación lineal entre las coberturas de las transectas (vegetal y costra salina) y los parámetros de suelo (Salinidad y Conductividad Eléctrica).

El valor del coeficiente de correlación puede variar de  $-1$  a  $+1$ . Mientras mayor sea el valor absoluto del coeficiente, más fuerte será la relación entre las variables. Un valor absoluto de 1 indica una relación lineal perfecta. Una correlación cercana a 0 indica que no existe relación lineal entre las variables.

El signo del coeficiente indica la dirección de la relación. Si ambas variables tienden a aumentar o disminuir a la vez, el coeficiente es positivo y la línea que representa la correlación forma una pendiente hacia arriba. Si una variable tiende a incrementarse mientras la otra disminuye, el coeficiente es negativo y la línea que representa la correlación forma una pendiente hacia abajo.

Para determinar si la correlación entre las variables es significativa, se comparó el *valor p* con su nivel de significancia, siendo este valor el que indica si el coeficiente de correlación es significativamente diferente de 0 (un coeficiente de 0 indica que no existe una relación lineal). El nivel de significancia (denotado como  $\alpha$  o alfa) usado fue 0,1. Un  $\alpha$  de 0,1 indica que el riesgo de concluir que existe una correlación, cuando en realidad no es así, es 10%.

Los resultados y discusión obtenidos por sector de la variación del promedio anual de las coberturas absolutas de afloramientos salinos, se presentan directamente en el **Capítulo 12.8 - Estado Ecológico del Sistema, secciones 1.2.1.1.1.c para el Sistema La Punta – La Brava y 1.2.2.1.1.c para el Sistema Peine.**

Respecto a **las correlaciones de la salinidad en transectas** en los tres años de seguimiento, a continuación se presentan los resultados por sector de evaluación:

#### a) Sistema La Punta – La Brava

En este sistema que abarca los subsectores Tilopozo y La Punta- La Brava, la **Tabla N° 2-2** muestra los valores de los coeficientes de correlación entre los parámetros de evaluación del sustrato salino: coberturas en las transectas (de vegetación y afloramiento salino) con la Salinidad y Conductividad Eléctrica medida en la componente suelo (calicatas) para los dos estratos de registro (S-1 y S-2).

En base a este análisis, se determinan en términos de su magnitud y significancia, distintas relaciones existentes entre los recubrimientos en las transectas y los parámetros de salinidad del suelo. Los casos de correlaciones con significancia estadística se registran en ocho de las 10 transectas evaluadas; entre éstas destaca en la mayoría de los casos la relación proporcional de la cobertura vegetal (Cv) con la salinidad y conductividad eléctrica del suelo; no obstante en formaciones del subsector La Punta se registran relaciones inversas entre los parámetros estudiados en la T12 (matorral de *S. fructicosa*), en la T13 (herbazal de *J. balticus*) con la conductividad eléctrica y en la T11 (herbazal de *T. concina*) con la salinidad (**Tabla N° 2-2**).

Las formaciones con relación inversa (significativa) entre la cobertura vegetal y la salinidad del suelo en el subsector La Punta, sugieren posiblemente a una menor resiliencia de la actividad y cobertura vegetal a la concentración salina del suelo en éste subsector, el cual además posee una baja salinidad, según parámetros de conductividad eléctrica registrados usualmente registrados en el rango ligeramente salino (2.000 - 4.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) y salinidad inferior a 10.000 mg/kg. En base a esto, en los seguimientos posteriores se debe considerar mayor atención ante una posible variación de la salinidad, lo cual podría afectar prioritariamente la actividad y/o cobertura de éstas formaciones.

Respecto a las correlaciones entre la cobertura de afloramientos salinos (Cs) y la concentración del suelo, se registran casos significativos en tres de las 10 transectas evaluadas, de éstos en las transectas T10 (herbazal de *T. concina* en subsector La Brava) y T27 (herbazal de *D. spicata* en subsector Tilopozo) se determinaron relaciones proporcionales con la salinidad del primer estrato; mientras que se observan relaciones inversas en la transecta T20 (herbazal de *D. spicata* en subsector Tilopozo; **Tabla N° 2-2**).

Los dos casos con correlación significativa proporcional (signo positivo) entre la cobertura salina y la concentración de ésta en el suelo, registran a la vez, variaciones significativas de descenso de la cobertura salina en T27 y de la cobertura vegetal en T10 (detalle de tendencias en la cobertura vegetal en sección **Tabla N° 2-2**):

- El descenso en T27 se relaciona principalmente con una baja en la salinidad del suelo durante los monitoreos de verano 2017 a invierno 2018 (M2, M3, M4 y M5), seguido por una recuperación en el periodo pos-estival en verano de 2019.
- Por parte del descenso en la cobertura vegetal de la T10, se asocia con la amplia variación en la salinidad del suelo, según registros de la conductividad eléctrica en un rango de Ligeramente a Extremadamente salino (3.490 a 18.890  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), lo cual puede afectar el sustento de la actividad y cobertura en esta formación.

Respecto al caso de correlación significativa inversa (signo negativo) de la salinidad con la cobertura salina en la T20, ésta registra un amplio rango de variación de la salinidad del suelo, según valores de la conductividad eléctrica entre Ligeramente a Extremadamente salino (3.630 a 19.240  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), por lo cual el sentido de la relación determinada con la cobertura salina está afecta por la alta variación de los parámetros con los que fueron correlacionados.

**Tabla N° 2-2. Coeficientes de correlación lineal entre parámetros de evaluación del sustrato salino: Coberturas de afloramiento salino y vegetal (Cs y Cv) medidas en transectas de vegetación, con Salinidad y Conductividad Eléctrica tomados por la componente suelo según las formaciones azonales en seguimiento del sector Tilopozo – La Punta y La Brava.**

Formación vegetal	Códigos muestreo	Cob §	Correlación con Conductividad eléctrica				Correlación con Salinidad				
			Coef. Pearson		Coef. Spearman		Coef. Pearson		Coef. Spearman		
			S-1	S-2	S-1	S-2	S-1	S-2	S-1	S-2	
Herbazal	sca	S8 - T29	Cs	0,23	0,31	0,14	0,26	0,54	-0,09	0,40	0,25
		Cv	<b>0,72 *</b>	-0,09	<b>0,77 *</b>	0,03	<b>0,94 *</b>	-0,26	<b>0,89 *</b>	0,03	
	jb	S3 - T13	Cs	-0,48	-0,36	-0,60	-0,43	-0,08	0,00	0,03	-0,09
		Cv	0,33	<b>-0,76 **</b>	0,37	<b>-0,83 *</b>	<b>0,75 *</b>	0,70	0,43	0,54	
	tc	S6 - T10	Cs	0,41	0,33	<b>0,77 *</b>	0,26	0,50	0,35	0,66	-0,14
			Cv	-0,36	-0,22	-0,37	-0,31	-0,10	0,23	-0,26	0,14
		S5 - T11	Cs	0,37	0,29	0,43	0,49	0,00	0,29	0,37	0,49
			Cv	-0,56	-0,27	-0,54	-0,20	<b>-0,84 **</b>	-0,22	<b>-0,71 *</b>	0,03
	dp	S1 - T27	Cs	-0,20	-0,34	0,33	-0,09	<b>0,79 *</b>	-0,36	0,64	-0,21
			Cv	-0,03	-0,04	-0,09	-0,49	0,53	-0,05	0,26	-0,26
		S2 - T26	Cs	0,39	0,24	0,49	0,37	0,40	0,17	0,37	-0,09
			Cv	-0,25	-0,63	-0,26	-0,43	-0,23	-0,62	-0,26	-0,20
		S7 - T20	Cs	<b>-0,91 **</b>	-0,42	<b>-0,94 **</b>	-0,54	<b>-0,72 *</b>	-0,30	-0,60	-0,37
			Cv	0,23	-0,20	0,20	0,09	0,61	0,05	<b>0,77 *</b>	0,37
S9 - T21		Cs	0,45	-0,66	0,14	-0,49	0,44	-0,53	0,43	-0,60	
		Cv	-0,49	<b>0,78 *</b>	-0,06	0,70	-0,52	0,57	-0,46	0,55	
Matorral	Tb	S13 - T24	Cs	-0,15	-0,07	-0,26	-0,37	0,33	-0,51	0,03	-0,43
			Cv	-0,26	-0,52	-0,43	-0,60	0,23	0,34	0,03	-0,14

Formación vegetal	Códigos muestreo	Cob §	Correlación con Conductividad eléctrica				Correlación con Salinidad			
			Coef. Pearson		Coef. Spearman		Coef. Pearson		Coef. Spearman	
			S-1	S-2	S-1	S-2	S-1	S-2	S-1	S-2
Sf	S4 - T12	Cs	-0,20	0,30	-0,03	0,43	0,29	-0,70	0,54	-0,03
		Cv	<b>-0,83 *</b>	-0,66	-0,60	-0,26	<b>-0,99 **</b>	-0,31	<b>-1,00 **</b>	-0,31

§ **Cobertura absoluta en transectas:** **Cs:** Cobertura afloramientos salinos; **Cv:** Cobertura vegetal. Estratos de muestreo de suelo en cm: S-1 primer estrato y S-2 segundo estrato. **Especies dominantes en formaciones monitoreadas:** **sca:** *Schoenoplectus californicus*; **dp:** *Distichlis spicata*; **jb:** *Juncus balticus*.; **tc:** *Triglochin concinna*; **Tb:** *Tessaria absinthioides*. **Sf:** *Sarcocornia fruticosa*. **Coeficientes de correlación Pearson (paramétrico) y Spearman (no paramétrico):** Valores positivos cercanos a 1, significan relación proporcional de alta intensidad entre variables. **Nivel de Significancia de correlación en negrita:** \* 90% y \*\*95%. Sin asterisco, correlación no significativa.

### b) Sistema Peine

En el sector Peine, la **Tabla N° 2-3** muestra los valores de los coeficientes de correlación entre los parámetros de evaluación del sustrato salino: coberturas en las transectas (de vegetación y afloramiento salino) con la Salinidad y Conductividad Eléctrica medida en la componente suelo (calicatas) para los dos estratos de registro (S-1 y S-2).

En base a este análisis, se determinan en términos de su magnitud y significancia, distintas relaciones existentes entre los recubrimientos en las transectas y los parámetros de salinidad del suelo. Los casos de correlaciones con significancia estadística se registran en los herbazales de *D. spicata* y *S. californicus* (T09 y T04), el primero señalando relación proporcional entre la cobertura vegetal y la concentración de sales en el estrato más profundo S-2 del suelo. Mientras que el herbazal de *S. californicus* registra una relación significativa e inversa de la salinidad en el suelo con la cobertura de afloramientos salinos.

Destaca entre las correlaciones significativas, la T09 de herbazal de *D. spicata* con relación proporcional entre la cobertura vegetal y la salinidad (signo positivo), ya que a la vez, esta registra una baja de la cobertura salina en promedio de 12%. No obstante, durante los tres primeros años de monitoreo, se observa una estabilidad de la cobertura vegetal en esta transecta, lo que deberá ser analizado prioritariamente en los seguimientos posteriores, a fin de identificar oportunamente una variación en la vegetación de esta formación.

**Tabla N° 2-3. Coeficientes de correlación lineal entre parámetros de evaluación del sustrato salino: Coberturas de afloramiento salino y vegetal (Cs y Cv) medidas en transectas de vegetación, con Salinidad y Conductividad Eléctrica tomados por la componente suelo según las formaciones azonales en seguimiento del sector Peine.**

Formación vegetal	Códigos monitoreo	Cob §	Correlación con Conductividad eléctrica				Correlación con Salinidad			
			Coef. Pearson		Coef. Spearman		Coef. Pearson		Coef. Spearman	
			S-1	S-2	S-1	S-2	S-1	S-2	S-1	S-2
Herbazal	S10 - T28	Cs	0,09	-0,01	-0,26	-0,31	0,05	-0,05	-0,26	-0,31
		Cv	0,52	0,01	0,31	0,09	0,54	0,25	0,31	0,09
	S14 - T09	Cs	-0,08	-0,08	-0,14	-0,14	0,37	-0,67	0,09	-0,49
		Cv	0,23	0,13	<b>0,71 *</b>	<b>0,71 *</b>	-0,18	0,67	0,66	<b>0,94 *</b>
	sca S 11 - T04	Cs	-0,32	-0,60	-0,54	-0,34	-0,47	<b>-0,78 *</b>	<b>-0,78 *</b>	-0,51
		Cv	-0,06	<b>0,70 *</b>	-0,14	0,43	0,51	0,72	0,66	0,37
Matorral Tb	S12 - T07	Cs	-	-	-	-	-	-	-	-
		Cv	0,00	0,49	-0,09	0,37	-0,04	0,05	-0,09	-0,03

§ **Cobertura absoluta en transectas:** **Cs:** Cobertura afloramientos salinos; **Cv:** Cobertura vegetal. Estratos de muestreo de suelo: S-1 primer estrato y S-2 segundo estrato. . **Especies dominantes en formaciones monitoreadas:** **dp** *Distichlis spicata*, **sca** *Schoenoplectus californicus*, **Tb** *Tessaria absinthioides*. **Coeficientes de correlación Pearson (paramétrico) y Spearman (no paramétrico):** Valores positivos cercanos a 1, significan relación proporcional de alta intensidad entre variables. **Nivel de Significancia de correlación en negrita: \* 90%.** Sin asterisco, correlación no significativa.

### 3. ANÁLISIS DE LA COBERTURA ACTIVA

#### 3.1. Comparación de la cobertura activa con línea de base

La evaluación de la condición del estado ecológico en la cobertura activa obtenida a partir del NDVI de imágenes de alta resolución 2017-2019, se realiza por sector en consideración a lo señalado en el PMB, referente a que “*se establece como criterio de mantención del estado ecológico, que las variables de estado se mantengan dentro del registro de línea de base, esto es que los valores medidos anualmente en promedio, se mantengan en el rango de los valores registrados históricamente por sector.*”

Al respecto, en este acápite se evalúa por sector este punto en específico del PMB. Para esto, se compararon las superficies de 2017-2019 con las áreas máximas y mínimas propuestas para el seguimiento de polígonos de vegetación mediante imágenes de alta resolución según el Apéndice B del Anexo 2 de la Adenda 5 del Proyecto (**Tabla N° 3-1**).

La evaluación de cambios en el estado ecológico, se realizó de acuerdo a lo señalado en el PMB, que señala “*se entenderá como un cambio en tendencia según la evaluación realizada después de 3 años consecutivos (periodos), respecto su comportamiento previo de línea de base o registros históricos*”. De acuerdo a esto, se comparó la mantención de las coberturas anuales de monitoreo para el periodo posterior de operación del proyecto 2017-2019, dentro del rango de superficies históricas por sector (**Tabla N° 3-1**).

**Tabla N° 3-1. Registros históricos de superficies de vegetación activa obtenidos con el NDVI de imágenes de alta resolución.**

VALORES HISTÓRICOS DESDE ALTA RESOLUCIÓN		
Sector / Objeto de seguimiento	Superficie min. (ha)	Superficie máx. (ha)
Tilopozo - La Punta y La Brava/ Polígono de vegetación COT	113,6	343,3
Tilopozo - La Punta y La Brava/ Polígono Herbazal de <i>Schoenoplectus</i> <sup>§</sup>	26,0	59,2
Peine/ Polígono de vegetación COT	157,7	242,8
Peine/ Polígono Peine Herbazal de <i>Schoenoplectus</i> <sup>§</sup>	23,0	22,6

<sup>§</sup>La formación Herbazal de *Schoenoplectus* se evalúa en unidades de Vega con dominancia de *Schoenoplectus californicus* según homologación de las formaciones en seguimiento con la COT presentada en la **Tabla N°3-2**. Polígono de vegetación COT = superficie total del sector con vegetación. Fuente: Tabla 5.3 “Resumen de registros máximos y mínimos propuestos para monitoreo de vegetación y cuerpos acuáticos, mediante herramientas de teledetección para sectores Tilopozo, Peine, Soncor y Quelana”, del Apéndice B, Anexo N°2 (Adenda N°5 – RWL, 2015).

Los resultados y discusión obtenidos por sector de la comparación con la línea de base de la cobertura activa obtenida con el NDVI de imágenes de alta resolución, se presentan directamente en el **Capítulo 12.8 - Estado Ecológico del Sistema, secciones 1.2.1.1.2 para el Sistema La Punta – La Brava y 1.2.2.1.2 para el Sistema Peine.**

### 3.2. Análisis de recurrencia de la cobertura activa

De forma complementaria a lo exigido en el PMB, con las coberturas de vegetación activa obtenidas con el índice **NDVI de imágenes de alta resolución durante el periodo 2017-2019**, se analiza el comportamiento multitemporal de esta cobertura, utilizando las superficies obtenidas para los 3 años de monitoreo en el periodo marzo – abril<sup>3</sup>.

Este análisis complementario se realiza con el fin de evaluar la variabilidad espacial de la cobertura activa mediante un análisis del **nivel de recurrencia**<sup>4</sup> entre el año 2017 a 2019, de la cobertura activa en las formaciones azonales de monitoreo, donde las áreas de superposición resultantes representan el nivel variabilidad o estabilidad espacial en seguimientos sucesivos.

Las **áreas de evaluación de la recurrencia** corresponden a las formaciones vegetales de monitoreo por sector. Esto con el fin de poder relacionar los resultados de las coberturas vegetales medidas *in situ* (transectas), con la cobertura de vegetación activa registrada con el NDVI de imágenes de alta resolución y según unidades vegetales de la Carta de

<sup>3</sup> Se refiere como comportamiento multitemporal a las variaciones espaciales y temporales entre los tres monitoreos, ya que para evaluar una tendencia estadística se requieren de mayor cantidad de datos. Por lo mismo, esto último se analiza posteriormente con los datos provenientes de imágenes Landsat para un periodo de 10 años, 2009-2019.

<sup>4</sup> Nivel de recurrencia se refiere al número de superposiciones de una misma condición de análisis, es decir la presencia en seguimientos sucesivos, en este caso de la cobertura vegetal activa obtenida desde el índice NDVI para los años de monitoreo 2017-2019.

Ocupación de Tierras (COT). Para esto, previamente se realizó una selección y homologación de la denominación de las formaciones vegetales monitoreadas, según se presenta en la **Tabla N°3-2**.

Para la determinación de las áreas y sus niveles de recurrencia se consideraron aquellas superficies de vegetación activa que fueron el resultado de los cálculos obtenidos a partir del método COT- NDVI de imágenes satelitales<sup>5</sup>, que representan la cobertura vegetal de mayor grado de vigorosidad para el periodo de verano en los años 2017, 2018 y 2019. Las capas de entidades fueron interceptadas en formato *shape* entre ellas y luego con las unidades de formaciones de monitoreo, según los límites de la Carta de Ocupación de Tierras actual (COT, monitoreo 2019).

Estas coberturas de vegetación activa superpuestas, fueron clasificadas según el porcentaje presencia entre seguimientos 2017 – 2018 – 2019, considerando **cuatro estratos según el nivel recurrencia entre el año 1 y año 3 de monitoreo:**

- (1) no recurrente o presencia en uno de tres seguimientos (**1/3; 33%**),
- (2) recurrencia en dos de tres seguimientos (**2/3; 67%**),
- (3) recurrencia en tres de tres seguimientos (**3/3; 100%**) y
- (4) inactividad o recurrencia nula (**0/3; 0%**).

El proceso de determinación de los niveles de recurrencia se describe en la **Figura N° 3-1**.

La evaluación del cambio en la condición de la cobertura de vegetación activa, se realiza según las superficies determinadas para cada uno de los niveles de recurrencia en las formaciones vegetales en seguimiento por sector. Según esto, mayores superficies con nivel de recurrencia de 0% a 33%, sugieren una alta variabilidad/inestabilidad en la cobertura vegetal activa de la(s) formación(es) de seguimiento. Lo contrario se refleja en superficies con recurrencia de 100%, mostrando mayor estabilidad de la cobertura activa.

Los resultados y discusión del análisis de recurrencia de la cobertura activa por sector, se presentan a continuación.

---

<sup>5</sup> Metodología desarrollada, en Informes anuales del Plan de Manejo Biótico: Albemarle (2017) y Albemarle (2018).



**Tabla N°3-2. Homologación de formaciones vegetales de seguimiento, según monitoreos de Transectas y COT- NDVI**

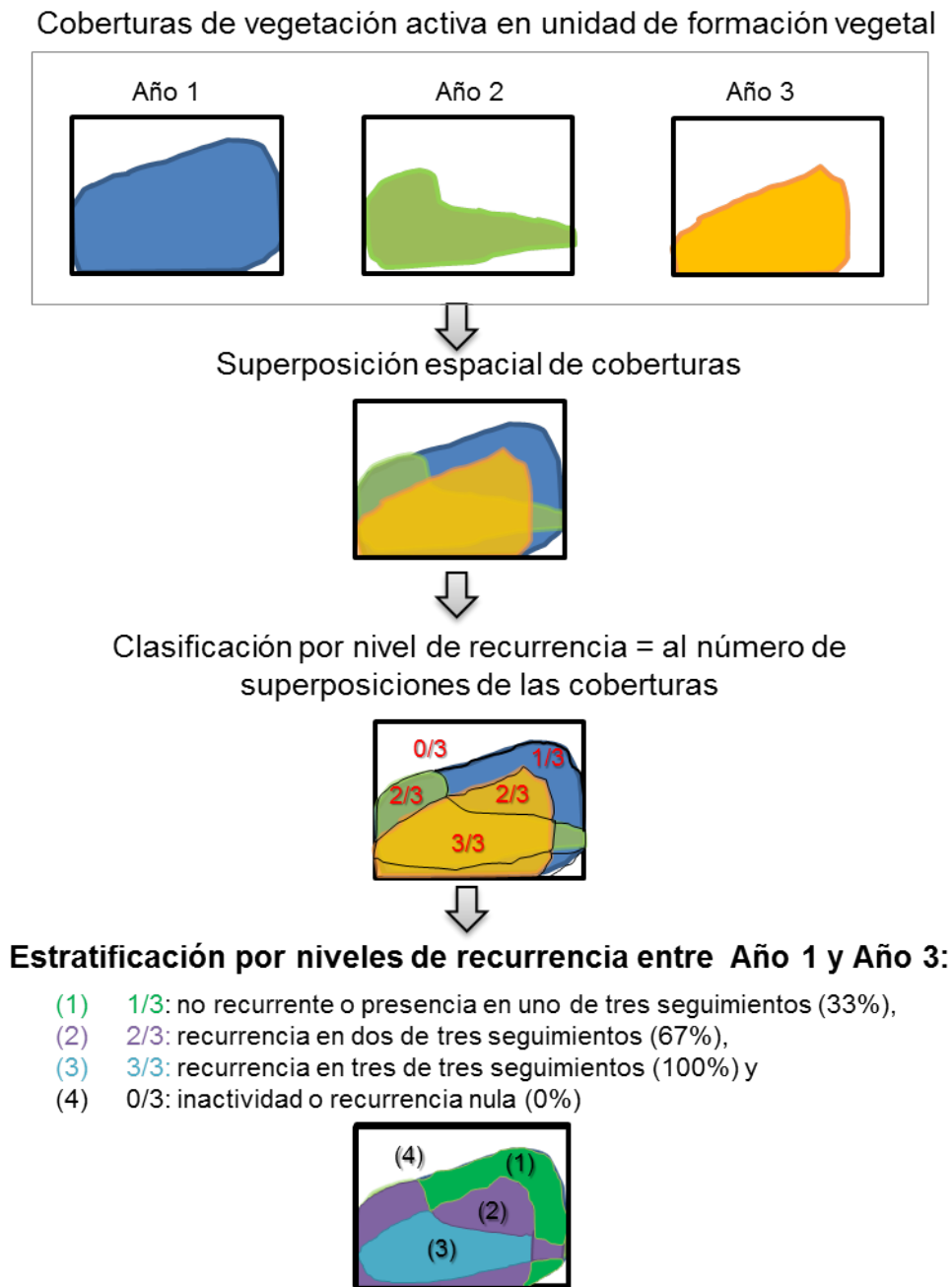
Formaciones vegetales de seguimiento en Transectas		Denominación de formaciones vegetales seguimiento en la COT y Vegetación activa- NDVI		
Formaciones monitoreadas	Transecta(s)	Formación Vegetal	Dominancia COT	
Herbazales	<i>Herbazal de Distichlis spicata</i>	T09; T20; T21; T22; T26; T27; T28	Vega de dp	Vega con dominancia de dp
		T08	Vega de dp bj	
	<i>Herbazal de Juncus balticus</i>	T13	Matorral hídrico - Vega de Lh jb	Matorral hídrico - Vega con dominancia de Lh
		-	Matorral hídrico - Vega de Lh jb dp	
		T18; T31	Vega de jb	
	<i>Herbazal de Schoenoplectus californicus</i>	T30	Vega de jb dp	Vega con dominancia de jb
		T01; T02; T03; T19; T29	Vega de sca bj	Vega con dominancia de sca
	-	Vega de sca		
	T04	Vega de sca bj dp		
	<i>Herbazal de Triglochin concinna</i>	T11	Vega de tc	Vega con dominancia de tc
T10		Vega de nia tc	Vega de nia tc	
Matorrales	<i>Matorral de Sarcocornia fruticosa</i>	T15	Matorral hídrico - Vega de Sf nia	Matorral hídrico - Vega con dominancia de Sf
		T12; T17	Matorral hídrico - Vega de Sf pu	
		-	Matorral hídrico - Vega de Sf dp; Matorral hídrico - Vega de Sf dp bj sca; Matorral hídrico - Vega de Sf dp bj; Matorral hídrico - Vega de Sf tc nia	
		T16	Matorral hídrico de Sf	
	<i>Matorral de Tessaria absinthioides</i>	T24; T25	Matorral - Vega de Tb dp	Matorral - Vega de Tb dp
		T23	Matorral de Tb	Matorral con dominancia de Tb
		T05; T06; T07	Matorral de Tb Aa	
	-	Matorral de Tb Lh; Matorral hídrico - Vega de Tb Lh dp	Matorral hídrico - Vega de Tb Lh dp	
Otros recubrimientos	T14	-	-	

Códigos especies arbustivas: Aa: *Atriplex atacamensis*, Lh: *Lycium humile*, Sf: *Sarcocornia fruticosa*, Tb: *Tessaria absinthioides*; Especies herbáceas: bj: *Baccharis juncea*, dp: *Distichlis spicata*, jb: *Juncus balticus*, nia: *Nitrophila atacamensis*, sca: *Schoenoplectus californicus*, tc: *Triglochin concinna*.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura N° 3-1. Proceso metodológico de determinación del nivel de recurrencia de la cobertura de vegetación activa obtenida con el NDVI de imágenes de alta resolución para el periodo de verano (post-lluvia) 2017-2019.**



Fuente: Elaboración propia

### a) Sistema La Punta - La Brava

La **Tabla N° 3-3** y la **Figura N° 3-2** presentan las superficies y los porcentajes de la cobertura vegetal activa según el nivel de recurrencia para los tres años de monitoreo anual (veranos post-lluvia, 2017-2019), el total por subsector y en las formaciones vegetales de estudio, respectivamente.

Para el sector, las formaciones en seguimiento abarcan una superficie COT total de 2.144,5 hectáreas según monitoreos 2017-2019; de ésta 687,6 hectáreas, equivalente a un 32,5%, corresponden a lo que ha reflejado actividad según el NDVI en alguno de los monitoreos. En contraparte domina la baja actividad o menor cobertura de la vegetación según el alto porcentaje inactivo en el sector con un 67,5% del total (1.426,9 hectáreas; **Tabla N° 3-3**).

Dentro de la cobertura activa del sector (687,6 hectáreas), 189,3 hectáreas presentan mayor nivel de recurrencia en 3 de los 3 monitoreos realizados (recurrencia 100%), lo que equivale a las superficies más estables dentro del sector. En el otro sentido, una superficie de 328,2 hectáreas, corresponde a la de menor nivel de recurrencia de 33%, reflejando esto una mayor inestabilidad de su actividad vegetal (**Tabla N° 3-3**). Esto último ocurre principalmente en el matorral de *Tessaria absinthioides* y el herbazal de *D. spicata* del subsector Tilopozo con 146,1 y 88,2 hectáreas con bajo nivel de recurrencia de 33% (**Figura N° 3-2**).

**Tabla N° 3-3. Superficies y porcentajes de cobertura de vegetación activa según nivel de recurrencia entre el Año 1 (2017) y Año 3 (2019) obtenidos con el NDVI de imágenes satelitales de alta resolución para monitoreos anuales de verano en las formaciones en seguimiento por subsector Tilopozo y La Punta-La Brava.**

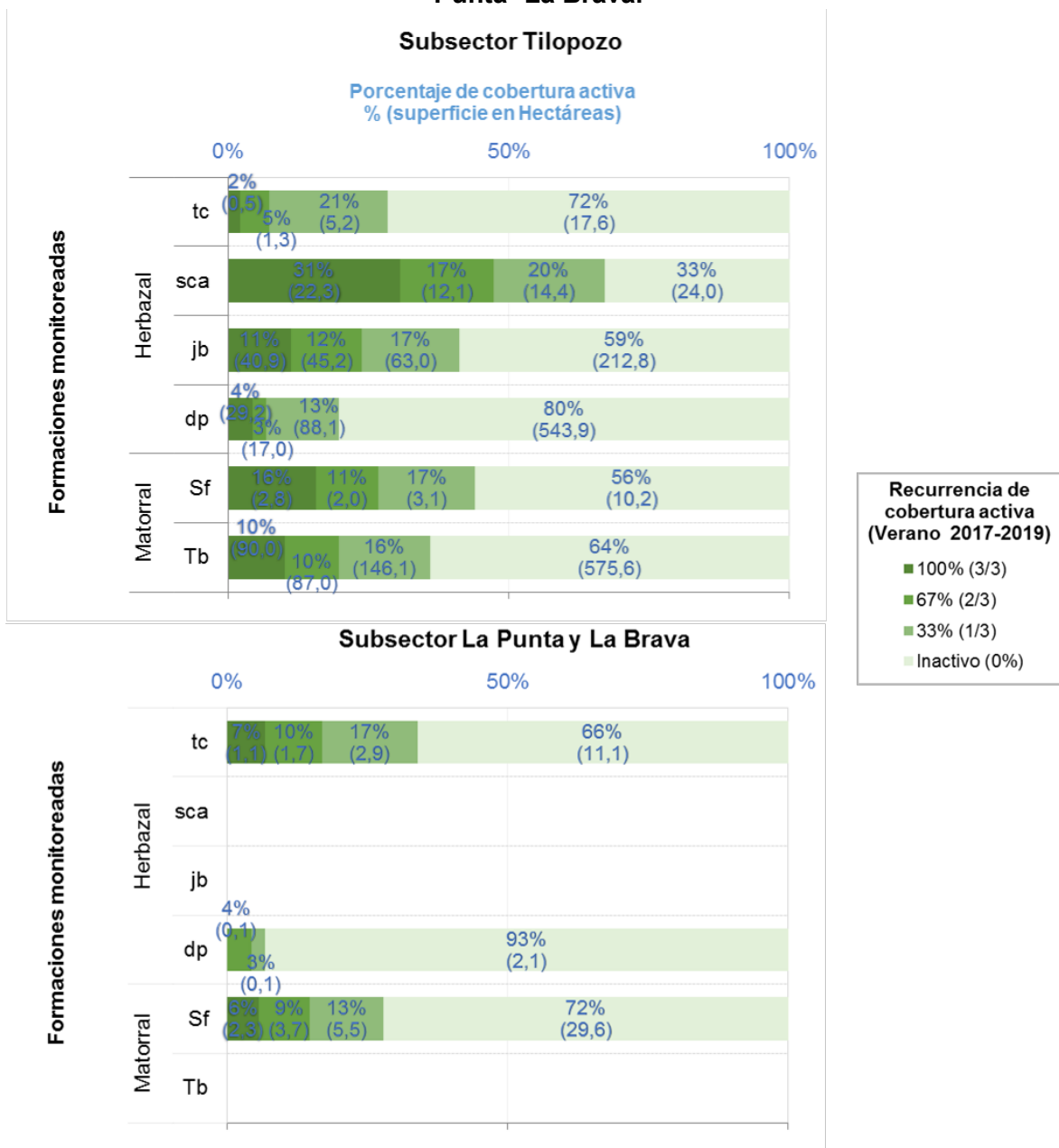
SUBSECTOR	Cobertura de vegetación por activa estrato según nivel de recurrencia Año 1-Año3								
	100% (3/3)		67% (2/3)		33% (1/3)		Inactivo (0%)		Total general**
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha
Tilopozo	185,8	9,0	164,6	8,0	319,8	15,6	1.384,0	67,4	2.054,3
La Punta y La Brava	3,5	5,7	5,5	9,2	8,4	13,9	42,9	71,2	60,3
<b>Total en formaciones de seguimiento*</b>	<b>189,3</b>	<b>9,0</b>	<b>170,1</b>	<b>8,0</b>	<b>328,2</b>	<b>15,5</b>	<b>1.426,9</b>	<b>67,5</b>	<b>2.114,5</b>

\* Formaciones vegetales de seguimiento según homologación entre la COT y monitoreos de transectas (detalle en Tabla N°3 1). \*\* Unión de unidades COT 2017, 2018 y 2019 de las formaciones vegetales de seguimiento.

Fuente: Elaboración propia.

**La Punta y La Brava** registra una cobertura activa entre 2017 y 2019 de 17,4 hectáreas en las formaciones en seguimiento (28,8% del total); no obstante, prevalece una baja actividad/cobertura de la vegetación, según el mayor porcentaje de superficie inactiva con 71,2% del total en seguimiento del sector (42,9 hectáreas; **Tabla N° 3-3**). Este subsector presenta tres formaciones monitoreadas, el matorral de *Sarcocornia fructicosa*, el herbazal de *Triglochin concinna* y el herbazal de *Distichlis spicata*, las cuales presentan baja actividad/vigor, según la alta proporción de su superficie con rango entre 66% y 93%, clasificada como inactiva en base al análisis NDVI (**Figura N° 3-2**).

**Figura N° 3-2. Evaluación de la recurrencia de la cobertura vegetal activa en las formaciones de monitoreo, obtenida con el NDVI de imágenes de alta resolución en monitoreos anuales de verano 2017-2019 en los subsectores de Tilopozo y La Punta- La Brava.**



Donde Especies dominantes en formaciones monitoreadas: Tb: *Tessaria absinthioides*; Sf: *Sarcocornia fruticosa*; dp: *Distichlis spicata*; tc: *Triglochin concinna*; sca: *Schoenoplectus californicus*; jb: *Juncus balticus*.

Fuente: Elaboración propia.

El comportamiento de baja respuesta del NDVI en el subsector **La Punta y La Brava**, concuerda con los seguimientos de COT y Transectas (T10, T11 y T12), los cuales expresan una baja cobertura vegetal en el sector. En el caso de las transectas, se registra la menor cobertura, con promedio de 39,1% en MB0. Además se observa una tendencia sostenida al descenso durante los seguimientos, siendo el caso más representativo el del herbazal de *Triglochin concinna* en la T10 (Formación vegetal COT: Vega de *Nitrophila atacamensis* y *Triglochin concinna*) con un descenso porcentual de un 73% en la cobertura desde M2 a M6 y respecto a MB0 y M1 (detalles de resultados de Transectas y **Figura N° 3-2**).

El subsector **Tilopozo**, presenta 670,2 hectáreas de cobertura activa entre 2017 y 2019, aunque es superior la inactiva con 1.384,0 hectáreas (67,4% de la superficie de las formaciones en seguimiento del sector; **Tabla N° 3-3**). Este resultado, se explica principalmente por la alta proporción (de un 80%; 543,9 hectáreas de su superficie) con cobertura inactiva en la formación de herbazal de *D. spicata* (**Figura N° 3-2**).

Los principales aportes a la cobertura inactiva en la formación de herbazal de *D. spicata* en el subsector Tilopozo, se presentan en cuatro unidades COT de baja cobertura vegetal y con superficie mayor a 40 hectáreas, las cuales reflejan una baja respuesta espectral del NDVI (coberturas inactivas entre 83 a 95%; códigos UC: ALB-026-63, ALB-023-7, ALB-024-36 y ALB-024-76). Entre éstas, destaca la unidad ALB-024-36 con registro de un 89% (89,2 hectáreas) de cobertura inactiva y con tendencia a la baja durante los monitoreos, acorde a los datos de la transecta T26 presente al interior de esta unidad (ver localización de las unidades cartográficas (UC) en mapas COT presentados en Anexo I).

#### **b) Sistema Peine**

La **Tabla N° 3-4** y la **Figura N° 3-3** presentan las superficies y los porcentajes de la cobertura vegetal activa según el nivel de recurrencia para los tres años de monitoreo anual (veranos post-lluvia, 2017-2019) en las formaciones vegetales en seguimiento del sector.

Este sector, destaca por la mayor cobertura activa entre los sectores de monitoreo, con un total de 813,4 hectáreas, lo cual equivale a un 36,6% de la superficie total de las formaciones en seguimiento del sector (2.224,8 hectáreas). Por otra parte, la cobertura inactiva abarca 1.411,4 hectáreas lo que equivale a un 63,4% de la superficie total en seguimiento (**Tabla N° 3-4**).

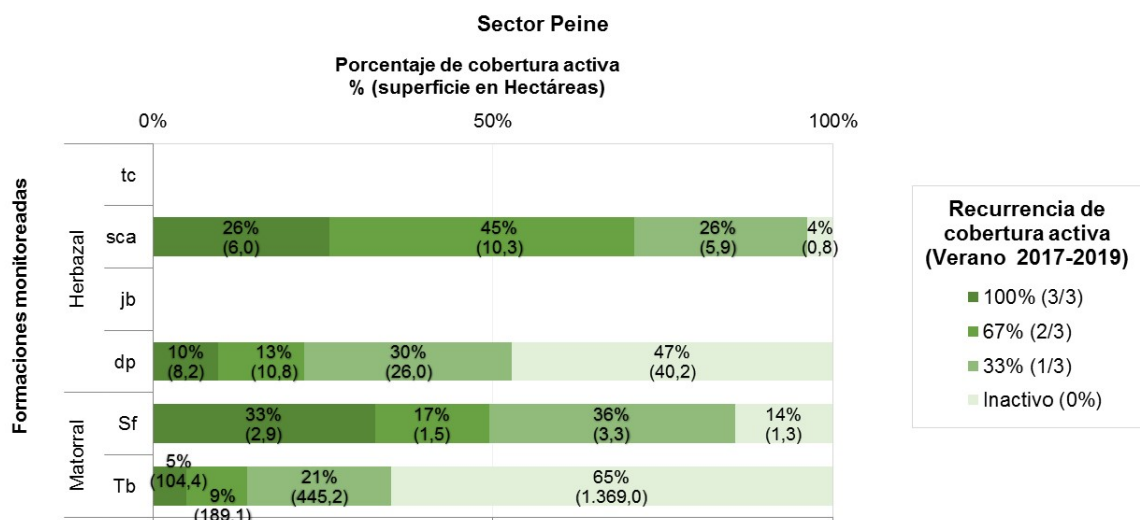
Dentro de la cobertura activa del sector (813,4 hectáreas), 121,5 hectáreas presentan mayor nivel de recurrencia en 3 de los 3 monitoreos realizados (recurrencia 100%), lo que equivale a las superficies más estables dentro del sector (**Tabla N° 3-4**). La formación que refleja esta condición de estabilidad es el matorral de *S. fruticosa*, el cual presentan la mayor proporción de 33% de su superficie con nivel de recurrencia de 100%, respectivamente y el matorral de *T. absinthioides* que abarca la mayor superficie de 104,4 hectáreas con 100% de recurrencia.

**Tabla N° 3-4. Superficies y porcentajes de cobertura de vegetación activa según nivel de recurrencia entre el Año 1 (2017) y Año 3 (2019) obtenidos con el NDVI de imágenes satelitales de alta resolución para monitoreos anuales de verano en las formaciones de seguimiento en el sector Peine.**

Sector Peine	Superficie y porcentaje por estrato según nivel de recurrencia entre Año 1 (2017) y Año 3 (2019)								
	100% (3/3)		67% (2/3)		33% (1/3)		Inactivo (0%)		Total general
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha
<b>Formaciones de seguimiento</b>	121,5	5,5	211,7	9,5	480,3	21,6	1.411,4	63,4	2.224,8

\* Formaciones vegetales de seguimiento según homologación entre la COT y monitoreos de transectas (detalle en Tabla N°3 1). \*\* Unión de unidades COT 2017, 2018 y 2019 de las formaciones vegetales de seguimiento. Fuente: Cedrem Consultores.

**Figura N° 3-3. Evaluación de la recurrencia de la cobertura vegetal activa en las formaciones de monitoreo, obtenida con el NDVI de imágenes de alta resolución en monitoreos anuales de verano 2017-2019 en el sector Peine.**



Donde Especies dominantes en formaciones monitoreadas: Tb: *Tessaria absinthioides*; Sf: *Sarcocornia fruticosa*; dp: *Distichlis spicata*; tc: *Triglochin concinna*; sca: *Schoenoplectus californicus*; jb: *Juncus balticus*.  
 Fuente: Elaboración propia.

### 3.3. Comparación del NDVI Landsat con línea de base

Este análisis se realiza de forma complementaria a lo exigido por el PMB, para comparar los valores del NDVI de imágenes Landsat en el periodo posterior a la operación del proyecto (julio, 2016), con los registros propuestos para el monitoreo de vegetación mediante imágenes Landsat según el Apéndice B del Anexo 2 de la Adenda 5 del Proyecto (Tabla N° 3-5).

El análisis comparativo, se realiza de acuerdo a dicho Apéndice, que señala la probabilidad de excedencia de 75% del NDVI, es decir, valor que es superado un 75% de

las veces, como el límite para detectar si el sistema presenta una vigorosidad relativamente baja respecto a su comportamiento histórico.

Para hacer homólogo el cálculo de la probabilidad de excedencia de 75% del NDVI, con los registros de línea de base (1985-2015), se utilizaron los valores de las imágenes de la temporada estival (desde diciembre hasta abril) en cada año posterior a la fecha de operación del proyecto, es decir el periodo diciembre 2016 a marzo 2019. El proceso de obtención de los registros del NDVI Landsat, se describe en la **sección 3.4.1**.

La evaluación de cambios en el estado ecológico, se realizó de acuerdo a lo señalado en el PMB, que señala “*se entenderá como un cambio en tendencia según la evaluación realizada después de 3 años consecutivos (periodos), respecto su comportamiento previo de línea de base o registros históricos*”. De esta manera, la probabilidad de excedencia de 75% del NDVI de imágenes Landsat, para el periodo posterior a la operación del proyecto, se comparó con el registro histórico por sector según valores en la **Tabla N° 3-5**.

**Tabla N° 3-5. Registros históricos del NDVI de probabilidad de excedencia de 75% propuestos para monitoreo de vegetación con imágenes Landsat de media resolución.**

VALORES HISTÓRICOS MEDIANTE SATÉLITE LANDSAT DE MEDIA RESOLUCIÓN	
Sector / Objeto de seguimiento	NDVI (Probabilidad exc. 75%)
Tilopozo - La Punta y La Brava/ Polígono de vegetación COT	0,057
Tilopozo - La Punta y La Brava/ Polígonos de Herbazal de <i>Schoenoplectus</i> <sup>§</sup> de coberturas clara a muy densa	0,042 - 0,397
Peine/ Polígono de vegetación COT	0,058
Peine/ Polígono Peine Herbazal de <i>Schoenoplectus</i> <sup>§</sup> de cobertura muy densa	0,244

<sup>§</sup>La formación Herbazal de *Schoenoplectus* se evalúa en unidades de Vega con dominancia de *Schoenoplectus californicus* según homologación de las formaciones en seguimiento con la COT presentada en la **Tabla N°3-2**.

Nota: Valores según Tabla 5.1 “Resumen de registros NDVI de probabilidad de excedencia de 75% propuestos para monitoreo de Vegetación mediante herramientas de teledetección para sectores Tilopozo, Peine, Soncor y Quelana”, del Apéndice B, Anexo N°2 (Adenda N°5 – RWL, 2015). Fuente: Elaboración propia.

### 3.4. Comparación de la tendencia interanual del NDVI Landsat

De forma complementaria a lo exigido por el PMB y para poder evaluar estadísticamente cambios en la tendencia del NDVI, siendo éste el índice a partir del cual se determinan las coberturas de vegetación activa (como indicador de evaluación del estado ecológico), se analizó un periodo de estudio de 10 años superior al de seguimiento del proyecto (tres años) y con frecuencia estacional, dado que las imágenes Landsat, aunque de menor resolución espacial (pixel de 30x30m), se encuentran disponibles con una alta frecuencia temporal (16 días) y para un amplio periodo histórico comparado con las imágenes de alta resolución.

Cabe mencionar que las áreas para las cuales se realiza el análisis del NDVI con imágenes Landsat son las mismas del análisis del NDVI de imágenes de alta resolución

2017-2019, correspondientes a las formaciones vegetales en seguimiento por sector (según homologación en la **Tabla N°3-2** con unidades vegetales de la Carta de Ocupación de Tierras, COT).

A continuación, se describe la metodología empleada para el análisis de comparación de la tendencia con el NDVI de imágenes Landsat, mientras que los resultados y la discusión se presentan directamente en el **Capítulo 12.8 - Estado Ecológico del Sistema, secciones 1.2.1.1.2 para el Sistema La Punta – La Brava y 1.2.2.1.2 para el Sistema Peine.**

### 3.4.1. Obtención de registros NDVI Landsat

Para la obtención de los registros de NDVI, se descargaron y procesaron imágenes Landsat de resolución media, de tres tipos de sensores: 5 (TM), 7 (ETM+), y 8 (OLI), a modo de completar la serie temporal superior a 10 años de estudio (2009 – 2019) y considerando una imagen por estación (marzo-abril, agosto, octubre, diciembre). La **Tabla N°3-6** presenta el detalle de los sensores usados en el análisis del NDVI.

**Tabla N°3-6. Características de los sensores utilizados en el análisis NDVI.**

Sensor	Características	Detalle bandas utilizadas	Fechas de análisis
LANDSAT 5, TM (Thematic Mapper)	Bandas Sensor	3 rojo: 0.630–0.690 $\mu\text{m}$ 4 NIR: 0.77–0.90 $\mu\text{m}$	2009 (abril, agosto, octubre, diciembre) 2010 (marzo, agosto, octubre, diciembre) 2011 (marzo, agosto)
	Resolución espacial	Multiespectral: 30 mts	
LANDSAT 7, ETM+ (Enhanced Thematic Mapper)	Bandas Sensor	3: Rojo: 0.630–0.692 $\mu\text{m}$ 4: NIR: 0.772–0.898 $\mu\text{m}$ 8: Pancromática: 0.515–0.896 $\mu\text{m}$	2011 (octubre, noviembre) 2012 (abril, agosto, octubre, diciembre) 2013 (octubre)
	Resolución espacial	Pancromática: 15mts Multiespectral: 30 mts	
LANDSAT 8, OLI (Operational Land Imager)	Bandas Sensor	4: Rojo: 0.630–0.680 $\mu\text{m}$ 5: NIR: 0.845–0.885 $\mu\text{m}$ 8: Pancromática: 0.500–0.680 $\mu\text{m}$ 9: Cirrus: 1.360–1.390 $\mu\text{m}$	2013 (abril, agosto, diciembre) 2014 (marzo, agosto, octubre, diciembre) 2015 (abril, agosto, octubre, diciembre) 2016 (abril, agosto, octubre, diciembre) 2017 (marzo, agosto, octubre, diciembre) 2018 (marzo, agosto, octubre, diciembre) 2019 (marzo)
	Resolución espacial	Pancromática: 15mts Multiespectral: 30 mts	

Fuente: Cedrem Consultores.

Las imágenes fueron adquiridas a través de la plataforma Earth Explorer del Servicio Geológico de Estados Unidos – United States Geological Survey USGS (<http://earthexplorer.usgs.gov/>). Estas imágenes fueron obtenidas y procesadas



considerando cuatro imágenes anuales correspondientes a una por estación, desde el año 2009 a 2018 (incluido marzo de 2019). Este conjunto de datos espaciales fue georreferenciado en Sistema de Referencia WGS84 (World Geodetic System 1984) y proyección cartográfica UTM zona 19S.

En la etapa de pre procesamiento, para cada imagen Landsat (y para cada una de sus bandas espectrales), se realizó una corrección radiométrica, la cual consiste en la conversión de los valores de píxeles desde números digitales (ND) a unidades de radiancia espectral absoluta [ $W / (m^2 * sr * \mu m)$ ]; en este proceso los valores desde ND se transformaron a valores de reflectancia *Top-Atmospheric* (TOA).

El proceso de corrección radiométrica se utiliza como medio de calibración para disminuir la falta de uniformidad en los valores digitales debido a efectos producidos por errores sistemáticos en el sensor, tales como la contaminación de partículas en su plano focal, las que pueden manifestarse en forma de manchas y bandas en las imágenes. Esta conversión proporciona una base para la comparación de datos en una sola escena o entre imágenes adquiridas en fechas diferentes o por diferentes sensores (Chander *et al.*, 2009).

Posteriormente, se realizó la corrección atmosférica de cada imagen. Esta corrección busca reducir el efecto de la interacción de las moléculas y partículas de la atmósfera (vapor de agua, polvo en suspensión, entre otras) en la radiación electromagnética captada por los sensores de un satélite. La eliminación de los efectos atmosféricos y del terreno, recuperan los parámetros físicos de la superficie incluyendo la reflectancia, visibilidad del suelo y temperatura.

En el caso particular de las imágenes del sensor Landsat 7, además se corrigió el bandeo proveniente de un fallo en el Corrector de Escaneo Lineal (SLC) del satélite. En cada imagen se usó una del mismo sensor y con posición del bandeo diferente (los archivos originales de la imagen traen la información que debe ser reconstituida). En total, se utilizaron siete imágenes de este sensor y fueron usadas a modo de lograr completar la serie de tiempo estacional y multianual superior a 10 años de análisis.

Para todas las imágenes Landsat, la automatización del proceso de correcciones radiométrica y atmosférica; así como el relleno del bandeo en el caso de imágenes del sensor Landsat 7, se realizó mediante la plataforma de análisis “R”, que se encuentra bajo la Licencia Pública General (GPL por sus siglas en inglés) del proyecto colaborativo de software libre GNU. La secuencia de operaciones se ejecutó en un *script*, basados en los paquetes *RStoolbox*, *Landsat*, *Landsat8*, *Rgdal* (*gdal\_fillnodata*), *Rgeos*, y *Raster*; este *script* también consideró la obtención del índice espectral NDVI.

El proceso de definición del tamaño de la muestra para el proceso de extracción de datos NDVI, tuvo en cuenta los estratos temáticos, según superficies de las formaciones de seguimiento por nivel de recurrencia de vegetación activa, las cuales fueron determinadas previamente a partir de los monitoreos con el NDVI de alta resolución 2017-2019 (detalle



de este proceso en **sección 3.1**), y el grado de confianza que se requería evaluar. El tamaño de muestra total se calculó a partir de la ecuación (Chuvieco, 2002):

$$n = (z^2 s^2) / (L^2 + (s^2 z^2) / N)$$

Donde: L: intervalo de error tolerable (0.05 (5%));  $s^2$  varianza muestral<sup>6</sup>; z: rango de probabilidad (para nivel de confianza 95%,  $z = 1,96$ ); N: tamaño de la población<sup>7</sup>

A partir de este cálculo se generó una malla de puntos aleatorios utilizando una herramienta de generación automática de ArcGis®, en base a la ubicación espacial de los estratos y el número estimado para cada uno de ellos.

La **Tabla N°3-7** presenta el tamaño de la muestra, proporcional con la superficie por estrato según nivel de recurrencia de la cobertura vegetal activa obtenida con el NDVI de imágenes de alta resolución durante monitoreos 2017-2019 en las formaciones de monitoreo por sector (detalle de éste proceso previo, en **sección 3.1**).

**Tabla N°3-7. Tamaño muestral de registros del NDVI Landsat 2009-2019, determinado por estratos según nivel de recurrencia de la cobertura vegetal activa obtenida desde el NDVI de imágenes de alta resolución de los monitoreos de verano 2017-2019.**

Sistema	Sector	Estratos de muestreo según nivel de recurrencia*	Tamaño muestral (n)
Tilopozo - La Punta y La Brava	Tilopozo	(1) no recurrente o presencia en uno de tres seguimientos (33%)	119
		(2) recurrencia en dos de tres seguimientos (67%)	49
		(3) recurrencia en tres de tres seguimientos (100%)	55
		(4) inactividad o recurrencia nula (0%).	218
	La Punta y La Brava	(1) no recurrente o presencia en uno de tres seguimientos (33%)	44
		(2) recurrencia en dos de tres seguimientos (67%)	35
		(3) recurrencia en tres de tres seguimientos (100%)	18
		(4) inactividad o recurrencia nula (0%).	97
Peine	(1) no recurrente o presencia en uno de tres seguimientos (33%)	84	
	(2) recurrencia en dos de tres seguimientos (67%)	29	
	(3) recurrencia en tres de tres seguimientos (100%)	29	
	(4) inactividad o recurrencia nula (0%).	149	

\* Detalle de **determinación de estratos de niveles de recurrencia en sección 3.1**. La mayor cantidad de puntos en el estrato de inactividad o recurrencia nula, se asocia a las mayores superficies para este estrato, existentes en las distintas formaciones de monitoreo en los sectores de estudio. Fuente: Cedrem Consultores.

### 3.4.2. Evaluación estadística de tendencias

Para evaluar estadísticamente un cambio en el valor interanual, es decir entre años, del NDVI Landsat para el periodo pre-operacional (2009-2016) y pos-operacional (2016-2019), se comparó la tendencia a escala interanual entre éstos dos periodos.

La determinación de la tendencia interanual en cada periodo, se realizó mediante la prueba no paramétrica Mann – Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1962). Esta prueba

<sup>6</sup> La varianza muestral en este caso se conocerá previo a la extracción de datos, por ende, se realiza una estimación *a priori* obteniendo un estimado de la desviación estándar de acuerdo a la “regla práctica del intervalo”, utilizando la ecuación:  $s \approx \frac{\text{rango}}{4}$ , donde el rango = valor máximo – valor mínimo.

<sup>7</sup> En este caso el tamaño de la población corresponde a las superficies por estratos y su proporción en pixeles.

proporciona un valor de significancia, *p-value*, cuyo valor inferior a 0,05 - 0,1 garantiza que la hipótesis adoptada tiene unas altas garantías de veracidad; a medida que este valor se hace más grande, las probabilidades van disminuyendo; hasta que, llegando a un valor de 1, la probabilidad es nula (Muñoz Marín, 2008). Además, un valor positivo del parámetro “S” es un indicador de una tendencia ascendente, y un valor negativo bajo indica una tendencia a la baja. El valor de este parámetro se acompaña del tamaño de la muestra, *n*, para cuantificar estadísticamente la importancia de la tendencia. Los cálculos de tendencia se realizaron con el software *R*, empleándose para su cálculo las librerías *Kendall* y *Stats*.

La evaluación de un cambio de estado ecológico, se realizó de acuerdo a lo señalado en el PMB, que señala “*se entenderá como un cambio en tendencia según la evaluación realizada después de 3 años consecutivos (periodos), respecto su comportamiento previo de línea de base o registros históricos*”. De esta manera, se analizó que la tendencia del NDVI durante el periodo pos-operación del proyecto 2016-2019, sea equivalente con la condición histórica pre-operacional. Este análisis enfocado principalmente, en descartar una tendencia al descenso del NDVI en el periodo pos-operacional, lo cual indicaría una baja en la actividad/vigor de las formaciones en seguimiento por sector.

### 3.5. Análisis de correlaciones con el NDVI

De forma complementaria a lo exigido por el PMB y con el propósito de robustecer la discusión y conclusiones de los posibles factores que indiquen en la condición o el estado ecológico de la vegetación del salar, a continuación se presenta un **análisis de relaciones del NDVI** con la cobertura de vegetación medida *in situ* mediante transectas (sección 2) y variables hidroclimáticas.

Para este fin, se determinaron las relaciones lineales entre el NDVI obtenido de imágenes tanto de alta resolución como Landsat con las coberturas absolutas de vegetación determinadas en las transectas de monitoreo, distinguiendo entre los tipos de formaciones vegetales, dado que se sabe de diferencias en la respuesta fenológica de actividad vegetal y por ende en los variación de los valores del NDVI.

También, las variables hidroclimáticas usadas para correlación con el NDVI de imágenes Landsat (por su mayor data multitemporal) fueron: la precipitación y evaporación de la estación Peine en el Salar.

Las correlaciones lineales entre variables, se determinaron con los coeficientes de Pearson (paramétrico) y Rho Spearman (no paramétrico) para examinar la fuerza y la dirección de la relación lineal entre el NDVI con las coberturas y variables hidroclimáticas.

El valor del coeficiente de correlación puede variar de  $-1$  a  $+1$ . Mientras mayor sea el valor absoluto del coeficiente, más fuerte será la relación entre las variables. Un valor absoluto de 1 indica una relación lineal perfecta. Una correlación cercana a 0 indica que no existe relación lineal entre las variables.

El signo del coeficiente indica la dirección de la relación. Si ambas variables tienden a aumentar o disminuir a la vez, el coeficiente es positivo y la línea que representa la correlación forma una pendiente hacia arriba. Si una variable tiende a incrementarse mientras la otra disminuye, el coeficiente es negativo y la línea que representa la correlación forma una pendiente hacia abajo.

Para determinar si la correlación entre las variables es significativa, se comparó el *valor p* con su nivel de significancia. Los niveles de significancia (denotado como  $\alpha$  o alfa) usados fueron 0,05 y 0,1. Un  $\alpha$  de 0,05 indica que el riesgo de concluir que existe una correlación, cuando en realidad no es así, es 5%. El *valor p* indica si el coeficiente de correlación es significativamente diferente de 0 (un coeficiente de 0 indica que no existe una relación lineal).

A continuación se describen los resultados de las correlaciones con el NDVI por variable de evaluación:

#### 3.5.1. Validación del NDVI con las coberturas en transectas

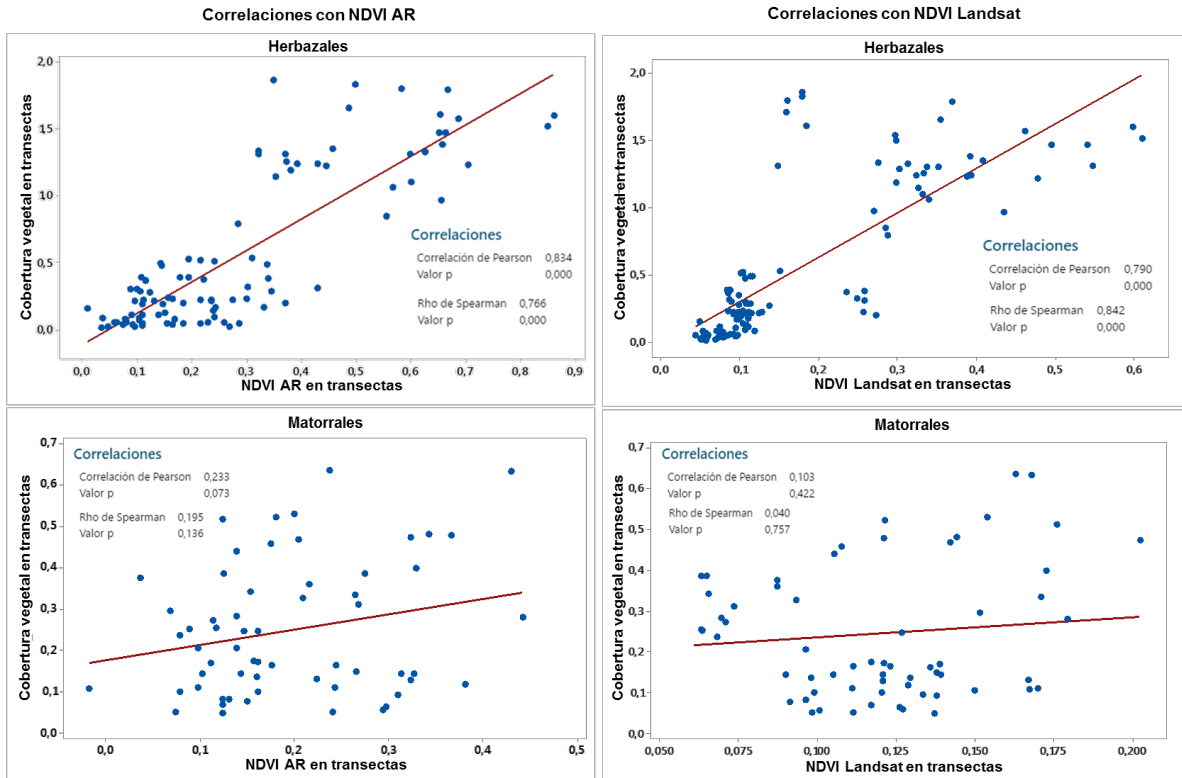
Los resultados de correlaciones lineales entre la cobertura vegetal en transectas (según monitoreos 2016-2019) con el NDVI obtenido de imágenes de alta resolución y Landsat, muestran una relación proporcional entre estas variables, es decir mayor NDVI se refleja con valores más altos de cobertura. Además, esta relación es significativa para las formaciones de herbazales (**Figura N° 3-4**).

En base a las correlaciones determinadas entre el NDVI y las coberturas vegetales en las transectas de monitoreo, las tendencias del NDVI Landsat se pueden extrapolar a las coberturas de herbazales (con correlaciones significativas; **Figura N° 3-4**). A partir de este ejercicio, se puede deducir una estabilidad en las coberturas vegetales para el periodo histórico 2009-2019 y las variaciones determinadas hacen parte de las transiciones generales en el sistema.

Salvo en estas tendencias de variación normal conforme al patrón histórico en los herbazales, existen dos casos con descenso importante:

- Una baja significativa en la cobertura de una transecta y que a la vez determinó una alta proporción de cobertura inactiva según el NDVI. Este caso corresponde al herbazal de *Triglochin concinna* en la **T10** (en subsector La Brava, formación vegetal COT: vega de *Nitrophila atacamensis* y *Triglochin concinna*) con un descenso porcentual de un 73% en la cobertura desde M2 a M6 y respecto a MB0 y M1.
- Un notorio descenso en la cobertura activa según NDVI de imágenes de alta resolución en la formación de herbazal de *S. californicus*, acompañado de un ascenso de la cobertura de rastrojo, cobertura vegetal muerta en la **T02** (en sector Peine, formación vegetal COT: vega de *S. californicus* y *Baccharis juncea*).

**Figura N° 3-4. Correlaciones lineales entre el NDVI (obtenidos de imágenes de Alta Resolución- AR *izquierda* y Landsat - *derecha*) y las coberturas vegetales en transectas de los tipos de vegetación de monitoreo (2016-2019): herbazales (*arriba*) y matorrales (*abajo*).**



**Nota:** Coefficientes de correlación Pearson (paramétrico) y Spearman (no paramétrico): Valores positivos cercanos a 1, significan relación proporcional de alta intensidad entre variables. El valor  $p < 0,05$ , refleja correlación significativa con nivel de confianza de 95%. Formaciones vegetales monitoreadas según homologación de la COT en base a monitoreos de transectas (detalle en sección 1.5). Fuente: Elaboración propia

### 3.5.2. Relación del NDVI con variables hidroclimáticas

Las correlaciones estimadas, muestran una relación significativa del NDVI con las variables hidroclimáticas y de mayor fuerza con la evaporación comparativamente con la precipitación (anuales), según promedio de los Coeficientes de Spearman  $-0,75$  y  $0,51$ , respectivamente. Entre estas variables, es de mayor importancia para la actividad vegetal con el *proxy* NDVI, la evaporación anual, posiblemente por los montos que implican anualmente (**Figura N° 3-5**).

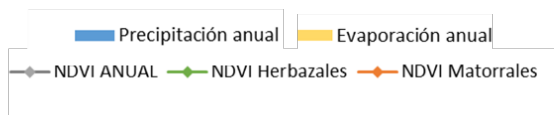
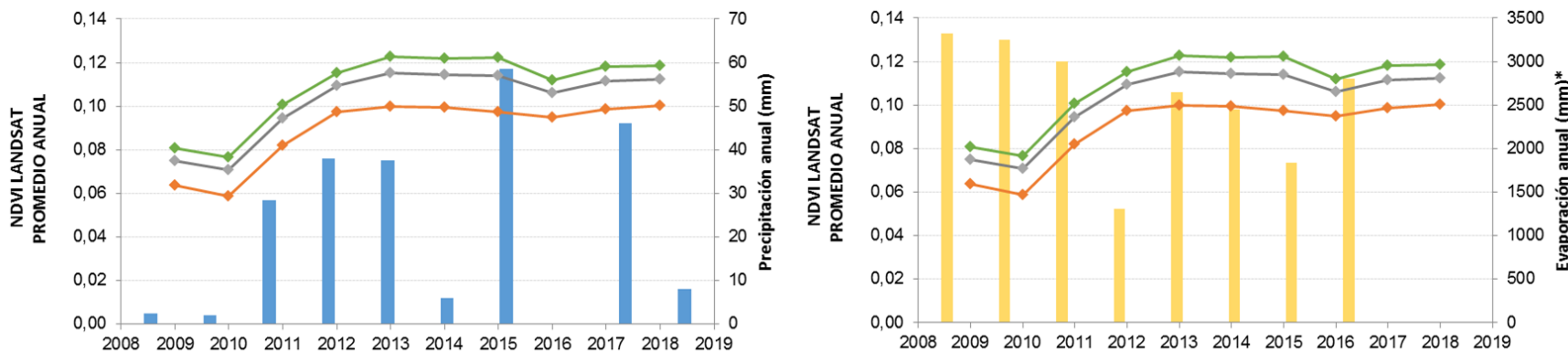
Las relaciones del NDVI con la precipitación son significativas para los promedios anuales en el total de las formaciones de monitoreo y en los herbazales; mientras que los matorrales muestran menor relación e incluso sin significancia estadística (**Figura N° 3-5**). Este resultado, se puede asociar a la mayor relación con la disponibilidad hídrica superficial y subsuperficial en el caso de los herbazales por su composición de especies más hidrófilas en comparación con los matorrales del Salar.

Además, la dirección de la correlación del NDVI con la precipitación y la evaporación es proporcional e inversa, respectivamente; así mayor actividad vegetal mediante aumentos del NDVI, se asocian con mayores montos de precipitación y una menor evaporación anual (**Figura N° 3-5**).

Por otra parte, las correlaciones estacionales del NDVI con la precipitación anual sugieren diferencias según el tipo de formación vegetal. Durante el verano (diciembre) la relación es significativa tanto para herbazales como matorrales y con coeficientes altos entre  $0,50$  y  $0,57$ . En los matorrales, la mayor relación lineal con el NDVI se determinó en el otoño del año siguiente al de las precipitaciones (Lag +1), con coeficiente significativo de hasta  $0,64$ . Para los herbazales, esto ocurre durante el verano y le sigue la estación de invierno con coeficientes de Rho Spearman de  $0,56$  y  $0,54$ , respectivamente (**Tabla N°3-8**).

Las relaciones estacionales de la precipitación con el NDVI, muestran que los herbazales responden en más corto plazo a la escasez o superávit hídrico del Salar, principalmente en invierno y verano del mismo año; mientras que los matorrales (con especies menos hidrófilas), tienen una respuesta de mayor plazo, incluso durante el otoño del año siguiente (**Tabla N°3-8**).

**Figura N° 3-5. Correlación multitemporal del NDVI Landsat promedio con variables hidroclimáticas (anuales en mm): precipitación, evaporación y balance precipitación- evaporación.**



**Coefficientes de correlación lineal  
 Pearson (paramétrico) y Rho Spearman (no paramétrico)**

VARIABLE HIDROCLIMÁTICA (mm)	NDVI TOTAL		NDVI HERBAZALES		NDVI MATORRALES	
	Pearson	Rho Spearman	Pearson	Rho Spearman	Pearson	Rho Spearman
Precipitación anual	0,51 *	0,52 *	0,53 *	0,59 *	0,48	0,4
Evaporación anual	-0,71 **	-0,74 **	-0,70 **	-0,76 **	-0,71 **	-0,7 **

Nivel de Significancia de correlación: \* 90% y \*\* 95%.  
 Sin asterisco, correlación no significativa

\* Sin información en registros de evaporación 2017-2019. Fuente: Elaboración propia a partir de datos meteorológicos de estación Peine.

**Tabla N°3-8. Coeficientes de correlación lineal del NDVI promedio por estación, obtenidos desde imágenes Landsat 2009-2019 con la precipitación anual (estación meteorológica Peine) en formaciones de herbazales y matorrales monitoreadas.**

Periodo de NDVI promedio (2009-2019)	HERBAZALES		MATORRALES	
	Pearson	Rho Spearman	Pearson	Rho Spearman
Otoño- Lag+1	0,233	0,236	0,552 *	0,636 **
Invierno- Lag+1	0,39	0,183	0,362	0,250
Invierno	0,487	0,539 *	0,427	0,406
Primavera	0,378	0,018	0,394	-0,103
Verano	0,571 *	0,564 *	0,55 *	0,503

**Nota:** Coeficientes de correlación Pearson (paramétrico) y Spearman (no paramétrico): Valores positivos cercanos a 1, significan relación proporcional de alta intensidad entre variables. Lag+1 significa rezago del NDVI en un año posterior al de lluvias. Nivel de Significancia de correlación: \* 90% y \*\* 95%. Sin asterisco, correlación no significativa.

Fuente: Elaboración propia.

---

#### 4. REFERENCIAS

ALBEMARLE. Informe Anual N°1 del Plan de Manejo Biótico: Monitoreo Invierno 2016 – Verano 2017 para el Proyecto “Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama (RCA RE N°21/2016)”, Antofagasta, Chile, 2017.

ALBEMARLE. Informe Anual N°2 del Plan de Manejo Biótico: Monitoreo Invierno 2017 – Verano 2018 para el Proyecto “Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama (RCA RE N°21/2016)”, Antofagasta, Chile, 2018.

KENDALL, M.G., Rank correlation methods. 3 ed. Ed. Hafner Publishing Company. New York, 1962.

KRIGE, D. G. A statistical approach to some mine valuation and allied problems on the Witwatersrand: By DG Krige (Doctoral dissertation, University of the Witwatersrand). 1951.

MANN. H.B., Non-parametric tests against trend, *Econometría*, 13, pp. 245–259, 1945. [22]

MUÑOZ Marín, C. M. Análisis de la variabilidad en series hidrometeorológicas en una cuenca de cabecera del Río Segura. 2008.