

Proyecto	SQMSL641				
Materia	Respuesta a observaciones planteadas por el Consejo de Pueblos Atacameños asociadas a la solicitud de análisis de poder estadístico del Apéndice 1.6. "Dinámica de la biota terrestres y acuática en el Borde Este del Salar de Atacama, Región de Antofagasta", del Anexo 1.01. (hoy, Apéndice 1.9 del Anexo 1.01)				
Distribución	SQMS Salar S.A.				
Código	GEOB.SQMSL641.MTE02	Elaborada por	GEM - Geobiota	Fecha Elab	07-10-2021

1 ANTECEDENTES

El informe "Dinámica de la biota terrestre y acuática en el Borde Este del Salar de Atacama, Región de Antofagasta" (Apéndice 1.6 (2020), tiene por objetivo dar respuesta a los cuestionamientos del cargo N°1 Extracción de salmuera por sobre lo autorizado durante el período entre agosto de 2013 y agosto de 2015 y sus posibles efectos sobre componentes bióticos.

Con este objetivo, se optó por realizar análisis de tendencia y cambios (regresiones y ANOVA, respectivamente) entre distintos periodos de tiempo, con la finalidad de detectar, entre otras cosas, la dinámica natural de la vegetación sin el Proyecto Cambios y Mejoras en la Operación Minera del Salar de Atacama (RCA 226/2006) y en particular evaluar la condición de la vegetación en el periodo con sobre-extracción de salmuera. Para esto, se definieron cuatro periodos de análisis: Periodo 1 – Previo a la RCA 226/2006 (1998 - 2007), Periodo 2 (2008 - 2012), Periodo 3 – Periodo cuestionado (2013 - 2015) y Periodo 4 (2016 - 2019). Adicionalmente se presentaron análisis considerando el periodo extendido de efectos; esto es Periodo 3 y Periodo 4, aumentando el número muestras para subsanar la poca cantidad de datos en el periodo 3.

El principal cuestionamiento del Consejo de Pueblos Atacameños (CPA) a los análisis de la vegetación presentados (Superficie de vegetación y actividad vegetacional medida como NDVI), radica en que la mayoría de ellos (regresión y ANOVA), generan conclusiones sin realizar una prueba de poder que permita identificar si la ausencia resultados significativos se debe a que no hay efectos en la vegetación o a que, las pruebas aplicadas no presentan suficiente poder estadístico como para identificar tendencias o cambios.

En el caso de la superficie de vegetación según mapa anual, al ser un registro único por año (para la vegetación total y de los de objetos de protección), los análisis de regresión y ANOVA son presentados de modo exploratorio, a pesar del bajo poder estadísticos de las pruebas. Para subsanar esta condición, la Superintendencia de Medio Ambiente (SMA) solicitó un análisis cualitativo de la dinámica de la superficie vegetacional, cuyos resultados se presentan en el Apéndice 1.9 del Anexo 1.01 (2021). Asimismo, en este Apéndice se agregó un análisis de la superficie con vegetación en todo el periodo con datos (2006-2019), verificándose que la superficie con vegetación presenta una tendencia al alza, principalmente desde el 2017 en adelante con la aparición de los pastos de Lluvias (matorral de Káuchal y pradera de Lukupa).

Basado en lo anterior, los análisis estadísticos presentados en esta minuta se enfocan en la actividad de la vegetación medida como NDVI, con el propósito de aportar antecedentes adicionales y realizar análisis estadísticos que permitan fundar con mayor certeza estadística los resultados obtenidos. Estos análisis se efectúan sobre la base de los valores de NDVI registrados para las unidades vegetacionales identificadas y considerando los escenarios metodológicos Landsat ND (nivel 1) y también el escenario Landsat SR (nivel 2) (Apéndice 1.9 del Anexo 1.01), considerando los periodos con mayor cantidad de muestras para aumentar el poder estadístico. Los periodos de análisis son los siguientes:

- Periodo de datos completo (2013-2019), con el objeto de verificar la dinámica global de la vegetación.
- Periodo cuestionado extendido (2013-2019), con la finalidad de evaluar el posible efecto de la sobre extracción de salmuera en base a un mayor número de observaciones, como se expone a continuación.

2 RESPUESTA

Con el objeto de aumentar el poder estadístico de los análisis realizados a partir de los datos de NDVI de cada uno de los polígonos de vegetación se realizó un análisis de regresión utilizando la técnica de Datos de Panel. A partir de este método, es posible aumentar considerablemente los grados de libertad del sistema, aumentando el poder estadístico del análisis. Para mayores antecedentes respecto a datos de panel se puede consultar Baltagi (2021).

Una regresión lineal para el NDVI de un polígono individual (unidad vegetacional básica analizada) posee la forma:

$$NDVI_{ti} = \beta_{0i} + \beta_{1i}t + \varepsilon_{ti}$$

Donde:

$NDVI_{ti}$ variable dependiente equivalente al NDVI del polígono i en el periodo t

t: tiempo (año)

β_{0i} : constante para la regresión del polígono i

β_{1i} : coeficiente de tendencia temporal para la regresión del polígono i

ε_{ti} : error de la regresión para periodo t y polígono i

En el caso de Datos de Panel, se asume que el coeficiente β_{1i} es igual para todas las regresiones, escribiéndose simplemente como β_1 . Por lo tanto, las regresiones para los polígonos tendrían la forma:

$$NDVI_{ti} = \beta_{0i} + \beta_1 t + \varepsilon_{ti}$$

Donde:

β_1 : ya no depende del polígono, sino que es el mismo parámetro para todos los polígonos. Este supuesto se revisa más adelante con objeto de entender su robustez estadística.

La técnica de datos de panel permitió analizar los valores de NDVI de las unidades vegetacionales incorporando simultáneamente la variable temporal. Así, esta técnica específica de regresión permite capturar la heterogeneidad entre las distintas unidades vegetacionales, así como la evolución de ellas a lo largo del tiempo.

- **Análisis de Periodo Completo (1998-2019)**

Al realizar el análisis de regresión para el Periodo Completo no se reconoce tendencia temporal al 95% de confianza. Para el escenario Landsat nivel 1 se identificó inercia negativa, como se presenta en la Figura 2-1. Esto significa que un NDVI de un polígono se ve influenciado por su NDVI del periodo anterior de forma inversa (un alto NDVI en el periodo anterior impactaría disminuyendo el NDVI del periodo siguiente). Esta inercia se debería a fenómenos no analizados, como cambios cíclicos en las precipitaciones año a año o adelantos/atrasos de la época de caída de hojas de algunas plantas de la zona. Lo anterior, podría tener relación con las importantes disminuciones estadísticamente significantes en los valores de NDVI registradas en el periodo previo a la RCA (1998-2007), donde se identificaron 2.190,4 ha que presentaron una tendencia a la baja (Sección 5.2.1 del Apéndice 1.6 Refundido). Esto deja en evidencia la existencia de una dinámica natural de la vegetación del Bordo Este, al tratarse de un periodo con ausencia de la operación del Proyecto Cambios y Mejoras en la Operación Minera del Salar de Atacama.

Figura 2-1. Regresión para NDVI con escenario Landsat nivel 1 para Periodo Completo

Dependent Variable: NDVI				
Method: Panel EGLS (Cross-section weights)				
Date: 10/07/21 Time: 12:03				
Sample (adjusted): 1999 2019				
Periods included: 21				
Cross-sections included: 830				
Total panel (balanced) observations: 17430				
Linear estimation after one-step weighting matrix				
White cross-section standard errors & covariance (d.f. corrected)				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	0.057961	0.004007	14.46584	0.0000
NDVI(-1)	0.127221	0.060375	2.107165	0.0351
Effects Specification				
Cross-section fixed (dummy variables)				
Weighted Statistics				
R-squared	0.947391	Mean dependent var	0.088744	
Adjusted R-squared	0.944761	S.D. dependent var	0.041905	
S.E. of regression	0.008782	Sum squared resid	1.280266	
F-statistic	360.1427	Durbin-Watson stat	1.945528	
Prob(F-statistic)	0.000000			
Unweighted Statistics				
R-squared	0.953099	Mean dependent var	0.066397	
Sum squared resid	1.281685	Durbin-Watson stat	1.876091	

Por otro lado, para el escenario Landsat nivel 2 no se identifica una regresión al 95% de confianza, por lo que se concluye que el NDVI no presenta tendencia temporal. Un ejemplo de regresión rechazada por bajo nivel de confianza se muestra

en la Figura 2-2. Se hace énfasis en que no existen disponibles test estadísticos complementarios para determinar el poder estadístico (de regresiones de datos de panel) dado que requieren supuestos adicionales respecto de las variables y de la regresión. En el análisis estadístico mediante datos de panel, ha sido documentado en extenso para comprender su poder estadístico (Taylor, 1980).

Los análisis realizados se consideran robustos, en vista que se desarrollaron a partir de 17.430 observaciones para el escenario Landsat nivel 1 y 46.284 observaciones para el escenario Landsat nivel 2. Por lo tanto, ambas regresiones presentadas fueron desarrolladas con un gran número de grados de libertad (16.598 para el Escenario ND - Nivel 1 y 44.078 para el Escenario SR - Nivel 2).

Cabe destacar que los parámetros estimados en esta regresión por mínimos cuadrados ordinarios poseen un alto nivel de robustez estadística (medida como un bajo error tipo II) de acuerdo a lo expuesto por Taylor (1980). Esto debido a que el número de polígonos exceden con creces los 50 que serían recomendados por este autor para 5 años de observaciones (para el caso del escenario Landsat nivel 2 hay 2.204 polígonos con 7 u 14 años, dependiendo de si se considera el periodo 2013-2019 o el periodo completo de análisis).

Figura 2-2. Regresión para NDVI con escenario Landsat nivel 2 para Periodo Completo

Dependent Variable: NDVI				
Method: Panel EGLS (Cross-section weights)				
Date: 10/07/21 Time: 12:04				
Sample (adjusted): 1999 2019				
Periods included: 21				
Cross-sections included: 2204				
Total panel (balanced) observations: 46284				
Linear estimation after one-step weighting matrix				
White cross-section standard errors & covariance (d.f. corrected)				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	-0.204387	0.533634	-0.383009	0.7017
YEAR	3.76E-07	7.24E-07	0.519585	0.6034
NDVI(-1)	0.066074	0.135344	0.488190	0.6254
Effects Specification				
Cross-section fixed (dummy variables)				
Weighted Statistics				
R-squared	0.926871	Mean dependent var	0.081195	
Adjusted R-squared	0.923212	S.D. dependent var	0.041171	
S.E. of regression	0.013220	Sum squared resid	7.702894	
F-statistic	253.3619	Durbin-Watson stat	1.872394	
Prob(F-statistic)	0.000000			
Unweighted Statistics				
R-squared	0.929906	Mean dependent var	0.076567	
Sum squared resid	7.939082	Durbin-Watson stat	1.646071	

De esta forma, en el periodo comprendido entre 1998 a 2019, no se identifica tendencia temporal para ninguno de los dos escenarios (Landsat ND nivel 1 y Landsat SR nivel 2), rechazándose la presencia de tendencia temporal del NDVI para el periodo analizado. Sin embargo, al comparar estos resultados con el análisis a nivel de polígonos presentado en el informe Dinámica de la vegetación del Bordo Este en el Salar de Atacama 1998-2019, se verifica que 90,7% no presenta una tendencia de los valores NDVI, el 8,2% de la superficie cubierta con vegetación presenta una tendencia al alza y sólo un 1,1% de la superficie a la baja. De lo anterior, se deduce que en ocasiones el análisis global enmascararía situaciones puntuales, perdiéndose la identificación de la variabilidad de la vegetación a nivel espacial.

- **Análisis de Periodo Cuestionado Extendido (2013-2019)**

Al realizar el análisis de regresión para el Periodo Cuestionado Extendido, mostrado en las Figura 2-3 y Figura 2-4, para el escenario Landsat nivel 1 y 2, respectivamente, se observa que en ambos niveles de imágenes se posee tendencia temporal positiva con más de un 97% de confianza para el Nivel 2 (y 99,9% para Nivel 1). Además, en el escenario Landsat nivel 1, nuevamente se identifica una inercia negativa en la variable NDVI.

Figura 2-3. Regresión para NDVI con el escenario Landsat nivel 1 para Periodo Cuestionado Extendido

Dependent Variable: NDVI				
Method: Panel EGLS (Cross-section weights)				
Date: 10/07/21 Time: 12:06				
Sample: 2013 2019				
Periods included: 7				
Cross-sections included: 830				
Total panel (balanced) observations: 5810				
Linear estimation after one-step weighting matrix				
White cross-section standard errors & covariance (d.f. corrected)				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	-2.020251	0.415021	-4.867829	0.0000
NDVI(-1)	-0.272084	0.101402	-2.683219	0.0073
YEAR	2.86E-06	5.68E-07	5.031418	0.0000
Effects Specification				
Cross-section fixed (dummy variables)				
Weighted Statistics				
R-squared	0.951152	Mean dependent var	0.101498	
Adjusted R-squared	0.942998	S.D. dependent var	0.060339	
S.E. of regression	0.009710	Sum squared resid	0.469375	
F-statistic	116.6427	Durbin-Watson stat	2.102599	
Prob(F-statistic)	0.000000			
Unweighted Statistics				
R-squared	0.942326	Mean dependent var	0.066367	
Sum squared resid	0.491281	Durbin-Watson stat	2.018360	

Figura 2-4. Regresión para NDVI con el escenario Landsat nivel 2 para Periodo Cuestionado Extendido

Dependent Variable: NDVI				
Method: Panel EGLS (Cross-section weights)				
Date: 10/07/21 Time: 12:06				
Sample: 2013 2019				
Periods included: 7				
Cross-sections included: 2204				
Total panel (balanced) observations: 15428				
Linear estimation after one-step weighting matrix				
White cross-section standard errors & covariance (d.f. corrected)				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	-2.563546	1.151590	-2.226092	0.0260
YEAR	3.59E-06	1.56E-06	2.293956	0.0218
Effects Specification				
Cross-section fixed (dummy variables)				
Weighted Statistics				
R-squared	0.967308	Mean dependent var	0.108912	
Adjusted R-squared	0.961859	S.D. dependent var	0.074313	
S.E. of regression	0.012301	Sum squared resid	2.000954	
F-statistic	177.5202	Durbin-Watson stat	2.316149	
Prob(F-statistic)	0.000000			
Unweighted Statistics				
R-squared	0.943010	Mean dependent var	0.078526	
Sum squared resid	2.057255	Durbin-Watson stat	2.016424	

Por lo tanto, se concluye que, en el Periodo Cuestionado Extendido, el NDVI de los polígonos posee tendencia positiva, aumentando en el tiempo.

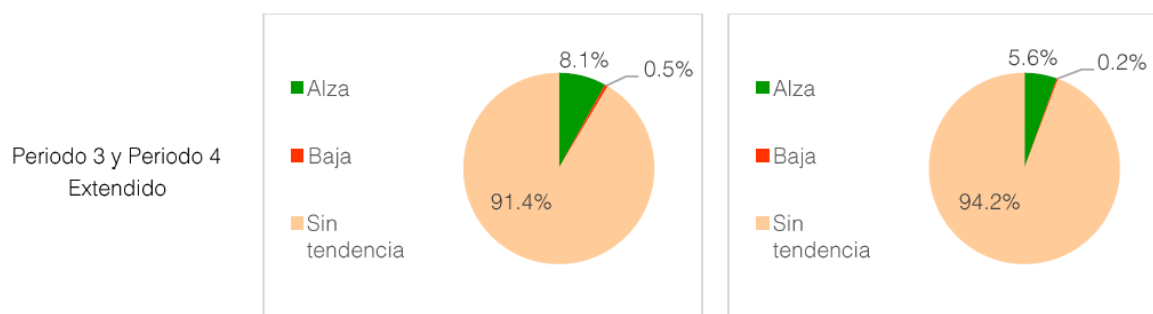
Este análisis es robusto, ya que se desarrolló a partir de 5.810 observaciones para el escenario Landsat nivel 1 y 15.428 observaciones para el escenario Landsat nivel 2. Por lo tanto, ambas regresiones presentadas fueron desarrolladas con un gran número de grados de libertad (4.978 para Nivel 1 y 13.222 para Nivel 2).

Además, el supuesto de que los coeficientes distintos a las constantes son iguales para todos los polígonos se valida mediante el indicador F-statistic y Prob(F-statistic). En este caso son 116,64 y 0 respectivamente para el escenario Landsat nivel 1 y 177,52 y 0 respectivamente para el escenario Landsat nivel 2, por lo que permiten rechazar la hipótesis nula de que son distintos en ambos casos. Cabe destacar que la Prob(F-statistic) corresponde al nivel de significancia de este test, por lo que se valida estadísticamente que las pendientes temporales en el caso de los polígonos son idénticas entre sí.

La conclusión presentada (tendencia temporal positiva del NDVI para el periodo 2013-2019) se condice con lo concluido por Geobiota en el Apéndice 1.6 refundido (2021). De su análisis se desprende "A modo de ampliar los análisis y detectar posibles efectos tardíos de la sobre extracción, se analiza el periodo cuestionado extendido, el cual comprende el periodo 2013-2019. Esta exploración confirma el aumento de la actividad vegetacional en este periodo (observado también en el análisis separado del periodo 4) y que la tendencia a la baja (reducción de valor de NDVI) se da en menos

del 2% de la superficie con vegetación”. Esta afirmación se acompaña por la Figura 2-5, que muestra que las zonas con tendencia al alza son superiores a las con tendencia a la baja.

Figura 2-5. Porcentajes de área con tendencia al alza y a la baja para el escenario Landsat nivel 1 (izquierda) y el escenario Landsat nivel 2 (derecha) para Periodo Cuestionado Extendido



Las tendencias al alza en la actividad vegetacional en este periodo se relacionarían principalmente con las formaciones dependientes del agua. Esto se verifica en el matorral de Káuchal y pradera de Lukupa, conocidos como pastos de lluvias, los cuales aumentaron su superficie de ocupación en el Borde Este, en respuesta a evento ocasionales de altas precipitaciones ocurridas en los últimos años.

3 CONCLUSIONES

Los análisis realizados mediante la técnica de regresión de datos de panel permiten concluir que:

- Los análisis de panel en los dos periodos de análisis (1998-2019 y 2013-2019) se consideran robustos, al desarrollarse con un gran número de grados de libertad, y con ello dar respuesta a lo requerido por el Consejo de Pueblos Atacameños (CPA).
- La bibliografía especializada (e.g. Taylor, 1980) considera la técnica de análisis de datos de Panel robusta en si misma. Por lo cual, no se desarrollan test adicionales a fin de determinar poder estadístico.
- No se reconoce tendencia temporal al 95% de confianza para el periodo completo (1998-2019). Esto se verificó para los valores de NDVI de las unidades vegetacionales con imágenes Landsat nivel 1 y también imágenes Landsat nivel 2, evidenciando que el comportamiento global de la vegetación en el periodo analizado no muestra un deterioro de ésta en el Borde Este del Salar de Atacama.
- Para el periodo cuestionado extendido (2013-2019) se identificaron tendencias temporales positivas (aumentos en los valores de NDVI). Esto se verificó para los valores de NDVI obtenidos de imágenes satelitales Landsat nivel 1 y también imágenes Landsat nivel 2, con una magnitud de confianza estadística de más de 97% y de 99,9% para el escenario Landsat nivel 1 y 2, respectivamente.
- De acuerdo a los resultados obtenidos, se observan consistencias con lo presentado en el Apéndice 1.6 (informe técnico - Dinámica de la biota terrestre y acuática en el Borde Este del Salar de Atacama Región de Antofagasta) en cuanto a que se confirmaría la ausencia de efectos debido a la sobre extracción de Salmuera.

4 BIBLIOGRAFÍA

- Taylor, W. (1980). Small sample considerations in estimation from panel data. *Journal of Econometrics*, Vol. 13, 203-223.
- Baltagi, B. (2021). *Econometric analysis of panel data*. Sexta edición, Springer, Cham, Suiza.