

Anexo 9. Protocolo de análisis de tendencias de variables ambientales e informe de análisis de metodologías de monitoreo CE y pH

Informe anual plan de seguimiento ambiental biótico - Proyecto Cambios y Mejoras en la Operación Minera del Salar de Atacama

Región de Antofagasta

Anexo 9. Protocolo de análisis de tendencias de variables ambientales e informe de análisis de metodologías de monitoreo CE y pH

GEOB.SQMSL861.INF001.ANX9 Informe anual plan de seguimiento ambiental biótico - Proyecto Cambios y Mejoras en la Operación Minera del Salar de Atacama

Rev.	Id	Ejecutor	Revisor	Aprueba	Descripción
B	Nombre	AA	IZ	IZ	Protocolo de análisis de tendencias Rev. (B)
	Fecha	08.04.2025			

Contenido

1	Protocolo para el análisis de tendencias de variables ambientales	1
2	Informe de análisis de metodologías de monitoreo de CE y pH	18

1 Protocolo para el análisis de tendencias de variables ambientales



Protocolo para el análisis de tendencias de variables ambientales

SQM SALAR S.A.

Santiago, abril de 2019



1 INTRODUCCIÓN

Con la finalidad de monitorear la influencia de las extracciones de agua dulce en los pozos Mullay 1, Allana y Camar 2 por parte de SQM Salar S.A. (en adelante SQM) sobre el sector Borde Este del Salar de Atacama, la RCA N°226/2006, en su considerando 10.3, ha dispuesto una serie de monitoreos periódicos de la vegetación y flora de la zona. Entre estos, se destaca la siguiente exigencia:

“Para el seguimiento de la flora del Borde Este se utilizará la red de puntos de muestreo establecida en las campañas de monitoreo previas a la operación del proyecto. Esta red consiste en un conjunto de siete transectos orientados en sentido Este-Oeste, en los que se dispuso un total de 75 puntos de muestreo, ubicados sistemáticamente cada 300 m. Cada punto de muestreo está compuesto por cinco parcelas de 4 m², lo que hace un total de 375 parcelas. En Figura I.5.2 del Anexo I de la Adenda III del EIA se presenta la distribución de los transectos, puntos de muestreo y esquema de distribución de las parcelas en el terreno. En Tabla 14 se entregan las coordenadas de los puntos de muestreo.”

“En cada punto de muestreo se medirá la frecuencia de especies presentes y se efectuará una caracterización del sustrato, a través de una descripción del suelo y mediciones de salinidad y pH. Se registrará además las especies observadas en el área de estudio fuera de los puntos de muestreo, a objeto de establecer la riqueza florística para toda el área de interés. Para la adecuada identificación de especies se tomarán muestras de ramillas, flores y frutos las que serán identificadas en el Herbario de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Chile.”

“La comparación de los resultados obtenidos en cada campaña de medición respecto de la situación de Línea base y anteriores mediciones efectuadas en la etapa de operación, permitirá la detección de cambios a nivel de la abundancia y riqueza de las especies para cada transecto definido en la Línea Base y para el área de estudio en general. Por otra parte, los muestreos de variables microambientales (particularmente el PH y la salinidad), permitirán detectar cambios a nivel del sustrato en cada transecto y relacionarlos con las mediciones efectuadas sobre la flora.”

En el marco de los monitoreos realizados en el Borde Este asociados a las exigencias antes citadas, desde el año 2012 en adelante se observó un cambio del comportamiento del pH y salinidad de los suelos. Este cambio generó la



formulación del Cargo N°5 presentado a través de la Res. Ex. N°1/ ROL F- 041-2016, el que dice relación a:

“Falta de análisis de los registros históricos de meteorología local y regional, monitoreo de variables hidrogeológicas y demás antecedentes provenientes de otros estudios efectuados tanto a nivel local como regional, que permitan identificar la ocurrencia de variaciones por factores naturales en el área de estudio (parcelas de vegetación), en consideración a que se constató en la afectación significativa de las variables de pH y salinidad del suelo, para el año 2013, advirtiéndose un aumento en el 90% de las muestras, pasando de suelos moderadamente salinos a suelos fuertemente salinos y un aumento en la alcalinidad del pH.”

Tomando en cuenta lo señalado anteriormente, y en consideración de la falta de una metodología estandarizada que permita identificar oportunamente la ocurrencia de variaciones temporales de los distintos parámetros monitoreados, el Programa de Cumplimiento de SQM, en su Acción 24 compromete:

“Implementar un protocolo para el análisis de tendencia de las variables ambientales de vegetación y/o variables microambientales”.

Y de este modo:

“Asegurar la revisión de posibles tendencias en el monitoreo de vegetación y/o variables microambientales”.

El presente informe describe el protocolo que se utilizará para la revisión anual de la tendencia de resultados de monitoreos de pH, salinidad (cuantificada como conductividad eléctrica) y flora. Tal protocolo será aplicado en los Informes de seguimiento de vegetación y flora realizados por SQM, pudiendo ser revisado en función de los monitoreos efectuados en el marco del plan de seguimiento ambiental biótico del proyecto.

2 PROCOTOLO DE EVALUACIÓN DE TENDENCIAS

2.1 Identificación de variables a considerar

Las variables de monitoreo anual a someter bajo el presente protocolo son:

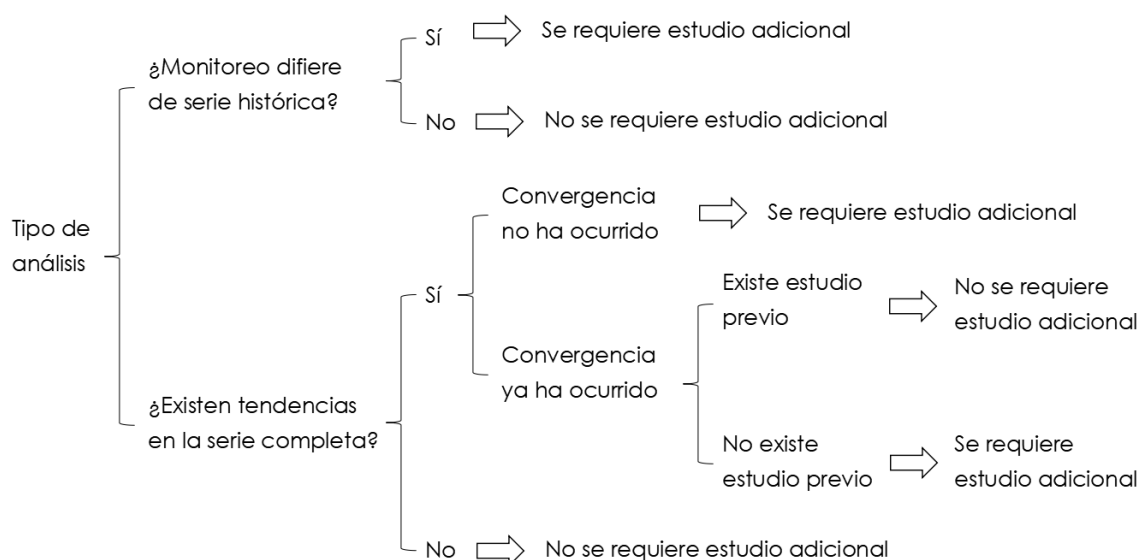
- pH
- Conductividad eléctrica
- Abundancia de flora
- Riqueza de flora

2.2 Procedimiento de evaluación de tendencias

Para evaluar si las observaciones de un monitoreo durante un año dado representan un cambio con respecto a observaciones previas, deben considerarse dos aspectos en cuanto a la naturaleza de dicho cambio: que la variable comience a cambiar durante el período actual de monitoreo, o que la variable ya esté cambiando de forma previa al monitoreo. Así, debe realizarse: i) una comparación del valor de la variable monitoreada en contraste con su comportamiento histórico (desagregación de monitoreo actual y comportamiento pasado) y ii) un estudio de la variable a través del tiempo hasta la actualidad (agregación de monitoreo actual y comportamiento pasado).

Si se concluye que el período que se está actualmente monitoreando es diferente a lo observado históricamente, será entonces necesario llevar a cabo un estudio más profundo en el que se identifiquen las posibles causas que generan dicho cambio, tal como lo dispone la RCA. A su vez, si al analizar la tendencia histórica se observa que el monitoreo actual no corresponde a un estado de equilibrio (es decir, si se espera que la serie continúe variando en el futuro), también se deberá realizar un estudio adicional de las causas que generan el cambio. Si la serie ya ha convergido, no será necesario profundizar en el factor que generó el cambio, siempre y cuando dicho cambio haya sido estudiado previamente. Este procedimiento se esquematiza en la Figura 1.

Figura 1. Árbol de decisión para necesidad de estudio de adicional



Fuente: Elaboración propia.

2.2.1 Comparación de monitoreo actual con serie histórica

Para evaluar si las observaciones de una campaña de monitoreo se comportan según lo observado históricamente, se llevarán a cabo los siguientes análisis:

- Para cada punto de monitoreo, se calculará la media y desviación estándar de los datos históricos (desde el año 2006 hasta el año anterior al monitoreo, realizando las transformaciones pertinentes si se trata de pH y conductividad, y de acuerdo al compromiso de la acción 24.3). Con esto se estimará el rango que está entre el valor medio $\pm 1,64485$ veces la desviación estándar¹. Se evaluará el porcentaje de lugares cuyo monitoreo se encuentra fuera del rango previamente calculado. Se considerará que el monitoreo actual difiere de la serie histórica si la cantidad de puntos de monitoreo fuera del rango definido es superior a 12². El diferir del comportamiento histórico

¹ En una distribución normal, tal rango abarca el 90% de los datos.

² Para un conjunto de 75 elementos en donde se define el rango [media $\pm 1,64485$ *desviación], se tiene que, si la variable distribuye normal, la probabilidad de que a lo más 12 elementos estén fuera del rango es de 96,7%. Así, se escoge 12 elementos como

implicará la realización de un estudio para evaluar las causas (por ejemplo, estudio a través de correlaciones).

- Considerando en conjunto todos los puntos de monitoreo, se evaluará si el set de datos del monitoreo actual posee la misma distribución de aquella observada durante los años anteriores (comparación año actual con cada año anterior de manera separada). De esta manera, se compara si hay diferencias estadísticamente significativas entre el año actual vs los monitoreos de cada uno de los años anteriores. Si la totalidad de los pares de años analizados mostraran diferencias significativas con el período actual, será necesaria la elaboración de un estudio que profundice las causas.

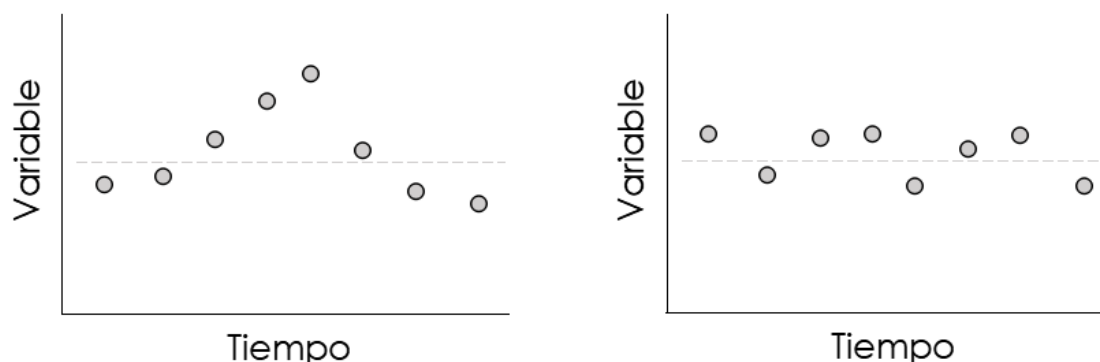
2.2.2 Evaluación de existencia de tendencia

Para cada punto de monitoreo se determinará si su serie de tiempo de parámetros queda representada por una recta de pendiente cero (análisis lineal con significancia estadística). Esto apunta a determinar si han existido tendencias sostenidas en el tiempo, aunque éstas ya no continúen en el momento del monitoreo (Figura 2). Se considerará que no existen tendencias de largo plazo si más del 90% de las series de tiempo de los puntos de monitoreo se ajustan a la recta de pendiente cero³.

la cantidad crítica cumpliéndose que, sin presencia de tendencias, menos del 4% de las veces habrá más de 12 elementos fuera del rango.

³ Metodologías disponibles para esta evaluación son determinación de R^2 y significancia de la pendiente, test de estacionariedad, etc.

Figura 2. Existencia de tendencias en datos. A la izquierda, los datos no quedan representados por una recta de pendiente cero debido a la presencia de una tendencia central. A la derecha, la recta de pendiente cero es representativa de los datos.



Fuente: Elaboración propia.

De existir tendencias en al menos el 10% de las parcelas, se evaluará si éstas continúan al momento del monitoreo. Para ello, se realizará un análisis de convergencia de los datos⁴. Si más del 10% de las parcelas presenta tendencia al momento del monitoreo, un análisis de causalidad de la tendencia debe ser llevado a cabo⁵.

3 CONCLUSIÓN

El presente informe ha presentado un protocolo para la determinación y análisis de tendencias de las variables monitoreadas en 75 puntos del Borde Este, a saber, pH, conductividad eléctrica y flora.

⁴ Diversas metodologías son posibles en este punto. Por ejemplo, la utilización de resultados del segundo punto de la sección 2.2.1, suavización y posterior evaluación de datos mediante promedios móviles, estimación de componentes mediante descomposición empírica en modos (EMD), índice de movimiento direccional promedio (ADX index), etc.

⁵ Se incluirán dentro del 10% las parcelas que hayan presentados tendencias al alza o baja en el pasado, y que si bien ya no presenten variaciones estadísticamente significativas a la fecha del monitoreo, no hayan sido analizadas en estudios previos.



Si bien, el presente protocolo apunta al análisis estadístico, es fuertemente recomendable que se incluyan otros enfoques, los que dependerán directamente de los valores de los datos monitoreados, quedando por tanto a criterio del analista su consideración. Así, por ejemplo, se recomienda observar la distribución espacial de tendencias en búsqueda de patrones geográficos: la aplicación del presente protocolo podría indicar que no son necesarios estudios adicionales, aunque un agrupamiento de pocas parcelas cercanas entre ellas y con presencia de tendencias podría ser indicio de afectaciones locales. Otro criterio relevante es la consideración de las especies que conforman la flora: si bien los valores de riqueza y abundancia podrían mantenerse sin tendencias, es importante observar que la conformación de las comunidades no presente variaciones. Todo lo anterior podría implicar la realización de estudios adicionales, aunque el presente protocolo no lo sugiera. Así, y para tales casos, se tomará una postura conservadora.

ANEXO A

EJEMPLO DE APLICACIÓN DEL PROTOCOLO PARA EL ANÁLISIS DE TENDENCIAS

Para una mayor comprensión de la aplicación del presente protocolo, se incluye a continuación un ejemplo.

Téngase una cierta variable observada a través del tiempo en los 75 puntos de monitoreo y cuyo valor va entre 0 y 100. Esta variable ha sido medida durante 7 años consecutivos. Los valores de esta variable se muestran en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Valores de una variable ejemplo medidos en los 75 puntos de monitoreo

Sitio	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7
TF-1-01	0,5	0,1	0,1	1,5	0,6	0,5	0,7
TF-1-02	0,7	20,9	15,3	14,7	11,1	0,3	8,2
TF-1-03	5,3	27,3	23,0	7,3	15,4	15,0	9,1
TF-1-04	36,3	21,1	10,3	25,5	11,4	16,6	11,1
TF-1-05	75,0	59,5	16,9	20,2	14,7	39,3	5,3
TF-1-06	25,2	46,6	11,0	14,0	6,5	17,9	7,4
TF-1-07	90,9	34,5	8,0	26,3	5,1	16,3	3,3
TF-1-08	49,1	44,0	7,6	8,1	3,8	19,0	5,8
TF-1-09	10,7	7,3	8,1	17,6	3,7	27,4	6,2
TF-1-10	5,9	7,7	11,1	18,8	3,9	16,4	6,3
TF-1-11	8,9	3,6	4,3	6,8	1,5	33,0	16,7
TF-1-12	21,4	5,9	5,4	21,0	0,7	31,4	4,0
TF-1-13	7,1	12,3	10,7	7,9	4,7	36,0	4,9
TF-1-14	8,8	16,2	9,8	20,3	3,9	45,9	8,3
TF-1-15	15,7	7,6	6,6	3,8	1,0	18,1	3,4
TF-1-16	15,7	3,4	3,7	1,0	0,6	15,4	3,7
TF-1-17	8,6	20,2	9,1	6,6	5,4	45,1	7,1
TF-1-18	15,7	12,8	12,0	4,0	3,3	24,5	6,6
TF-1-19	4,9	1,3	1,9	5,1	1,0	10,0	3,4

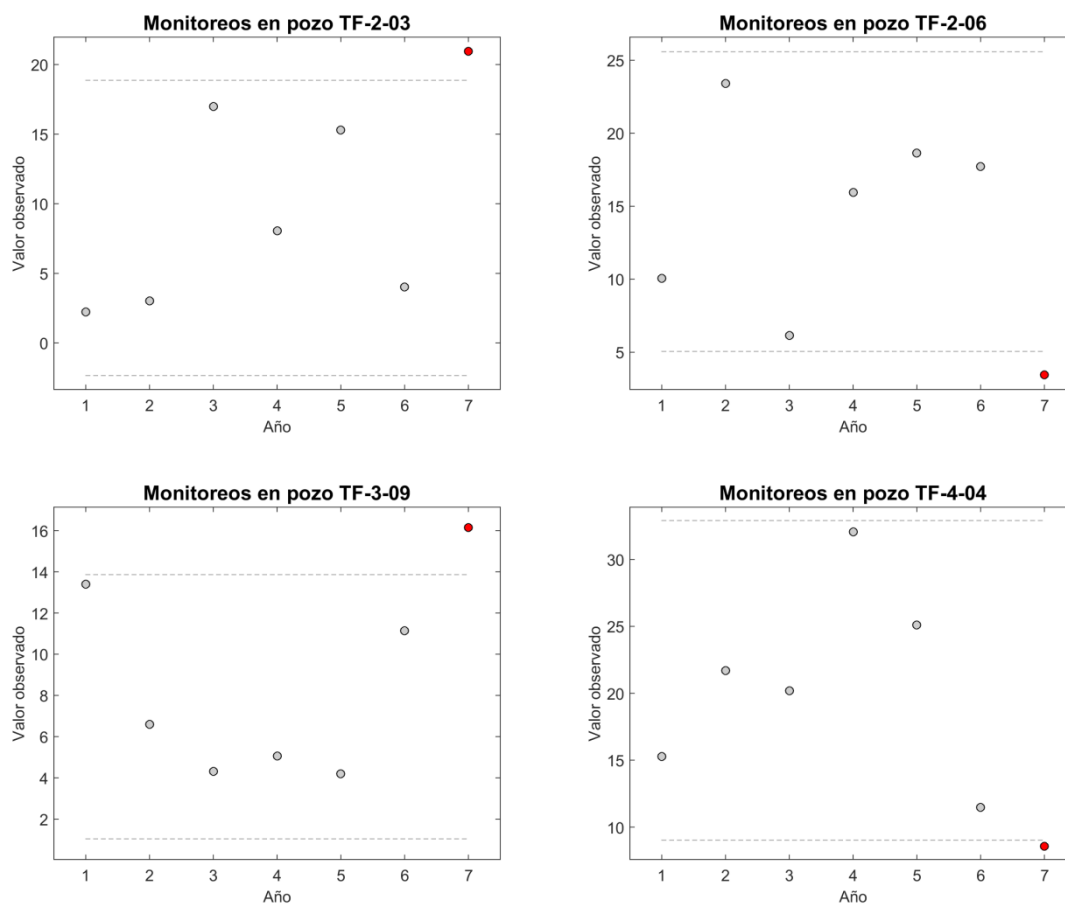
Sitio	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7
TF-2-01	0,7	0,7	1,6	0,9	0,8	0,6	0,9
TF-2-02	0,7	2,1	11,1	9,8	5,2	6,0	7,5
TF-2-03	2,2	3,0	17,0	8,1	15,3	4,0	21,0
TF-2-04	3,0	13,7	15,6	8,3	6,5	1,3	4,4
TF-2-05	6,1	24,5	8,7	29,2	25,0	42,0	12,4
TF-2-06	10,1	23,4	6,1	16,0	18,6	17,7	3,4
TF-2-07	16,9	20,2	3,9	2,9	9,8	12,8	4,6
TF-2-08	10,0	11,0	1,2	4,5	10,7	13,0	1,1
TF-2-09	21,8	21,0	4,1	7,8	5,4	11,9	2,8
TF-2-10	7,3	8,0	7,3	9,6	1,5	10,1	2,6
TF-2-11	7,7	10,2	4,1	7,0	1,9	26,4	4,8
TF-2-12	7,3	9,4	2,6	7,5	1,1	8,9	2,1
TF-2-13	77,8	70,7	39,9	37,5	11,1	25,0	3,1
TF-2-14	73,3	63,6	23,7	21,5	10,4	15,0	2,4
TF-3-01	3,0	2,3	4,8	12,1	2,4	8,3	10,5
TF-3-02	13,2	26,4	7,1	30,3	13,2	24,9	12,6
TF-3-03	18,6	22,6	6,2	10,4	4,4	17,9	8,4
TF-3-04	15,0	12,7	6,8	7,2	4,1	11,8	4,5
TF-3-05	15,4	25,6	14,6	6,6	18,0	26,8	5,9
TF-3-06	7,8	11,4	5,7	5,5	6,0	11,8	3,6
TF-3-07	8,9	4,5	7,7	6,5	4,0	6,6	5,8
TF-3-08	17,3	9,9	6,4	5,1	8,0	7,0	3,8
TF-3-09	13,4	6,6	4,3	5,1	4,2	11,1	16,1
TF-3-10	21,5	18,0	4,2	8,5	9,6	10,4	18,7
TF-4-01	0,4	0,5	14,8	0,3	0,1	0,3	0,2
TF-4-02	3,5	3,9	27,0	1,9	0,9	1,1	1,5
TF-4-03	2,9	10,5	41,9	20,7	3,7	10,9	11,9
TF-4-04	15,3	21,7	20,2	32,0	25,1	11,5	8,6
TF-4-05	1,8	6,6	5,5	25,7	10,9	15,2	6,4

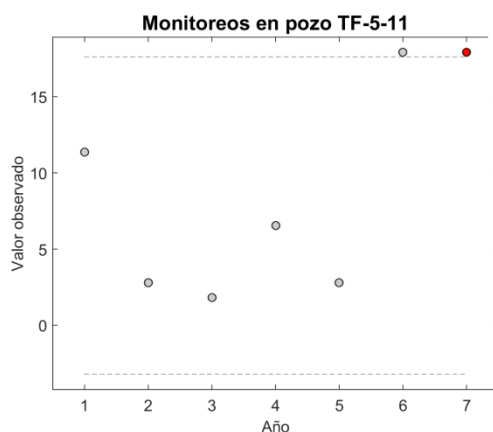
Sitio	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7
TF-4-06	14,5	26,7	1,2	19,7	21,8	16,1	6,8
TF-4-07	72,7	19,9	25,3	15,0	6,8	18,9	14,1
TF-4-08	23,9	74,1	9,7	19,8	13,4	17,7	18,4
TF-4-09	9,3	19,4	15,8	23,0	6,5	16,6	11,5
TF-5-01	0,1	2,7	12,0	17,8	16,6	13,0	9,8
TF-5-02	11,0	15,1	10,1	3,9	7,0	7,2	9,2
TF-5-03	12,2	12,2	8,5	28,1	6,1	3,4	11,0
TF-5-04	1,9	38,6	4,9	8,6	4,9	9,7	2,7
TF-5-05	23,1	26,3	7,8	13,6	18,6	21,5	16,5
TF-5-06	76,7	70,1	9,9	61,6	20,8	38,6	29,4
TF-5-07	100,0	73,5	8,2	17,3	28,5	27,8	19,4
TF-5-08	50,4	27,0	3,8	12,9	7,2	23,2	22,7
TF-5-09	40,6	13,0	2,3	9,3	4,9	21,3	16,9
TF-5-10	7,2	6,2	6,9	10,4	1,9	10,8	2,6
TF-5-11	11,4	2,8	1,8	6,5	2,8	17,9	17,9
TF-5-12	12,2	2,9	2,2	10,5	2,6	10,5	8,7
TF-5-13	11,3	3,5	1,7	12,6	2,7	8,3	5,4
TF-5-14	21,2	13,6	3,1	7,8	5,4	15,2	6,6
TF-6-01	75,0	63,5	5,1	11,0	33,8	22,6	19,5
TF-6-02	37,1	18,8	5,2	14,7	25,3	17,5	4,6
TF-6-03	29,0	31,4	7,5	10,8	25,7	16,6	9,5
TF-7-01	36,6	64,1	26,0	27,1	42,3	32,4	27,6
TF-7-02	14,8	15,5	13,9	8,1	9,4	10,6	8,0
TF-7-03	54,4	14,9	46,5	12,6	19,7	12,2	11,3
TF-7-04	6,0	6,9	2,4	8,6	11,4	27,4	5,8
TF-7-05	7,4	15,4	3,9	6,3	5,7	20,1	4,3
TF-7-06	10,5	5,2	5,8	4,1	3,1	7,2	6,9

Fuente: Elaboración propia.

El primer análisis a realizar es la comparación del monitoreo actual (es decir, el del año 7) versus el comportamiento histórico. De este modo, y para cada punto de monitoreo, se calcula el rango que va entre la media $\pm 1,64$ veces la desviación estándar. Luego se evalúa si el monitoreo del año 7 cae dentro de este rango. Así, para el presente ejemplo evaluado se tiene que 5 de los puntos de monitoreo presentan una medición en el año 7 fuera del rango definido. Estos casos se muestran en la Figura 1.

Figura 1. Casos de último monitoreo fuera del rango histórico.





Fuente: Elaboración propia.

Dado que sólo 5 casos presentan un registro actual fuera del rango histórico, no es necesario realizar un estudio adicional para determinar causalidad de tendencias (5 es menor a 12, en donde un estudio adicional debe realizarse cuando el número de casos fuera del rango definido es mayor a 12).

El segundo análisis a realizar es la existencia de tendencias. Para ello, se realiza sobre las series un test de estacionariedad¹ (se utiliza el test de arreglo inverso, Bendat and Piersol, 2010). Este test arroja la presencia de 8 puntos de monitoreo en donde sus datos no son estacionarios. Puesto que 8 es mayor al 10% de la cantidad de puntos de monitoreo ($8 > 7,5$), corresponde evaluar si la tendencia se mantiene a la fecha del último monitoreo. Para ello, se siguen los siguientes pasos:

- Se evalúa la curva de tendencia de los datos hasta el año 6 mediante un suavizado de éstos (para el caso, se utiliza un filtro Savitzky-Golay, el que corresponde a un promedio móvil ponderado²).
- Se calculan los residuos, es decir, la diferencia entre los datos observados y la curva de tendencia ajustada (hasta el año 6).

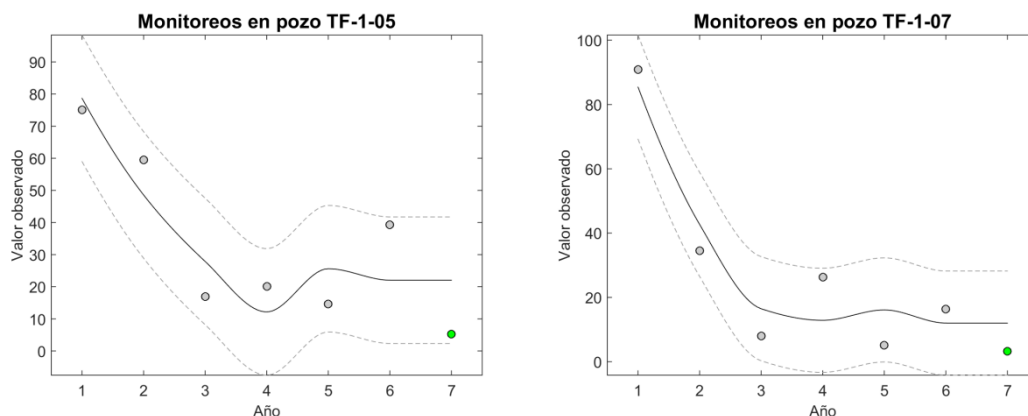
¹ Estacionariedad es la propiedad de las series de tiempo de conservar sus momentos estadísticos constantes a lo largo del tiempo. Ésta no debe confundirse con estacionalidad, la que es la relación de dependencia con una estación del año.

² Sin embargo, otros métodos también son válidos (por ejemplo, promedio móvil común). Se escoge el método Savitzky-Golay por no fijar los extremos, lo que es relevante dada la relativamente baja cantidad de años evaluados en este ejemplo.

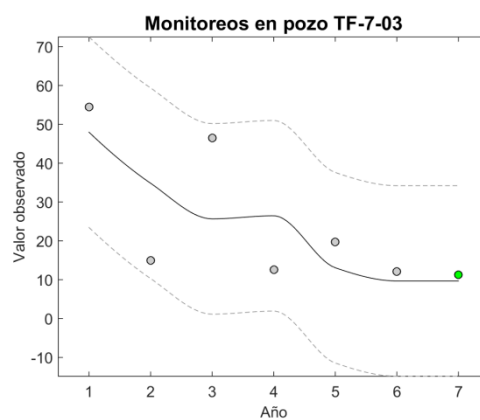
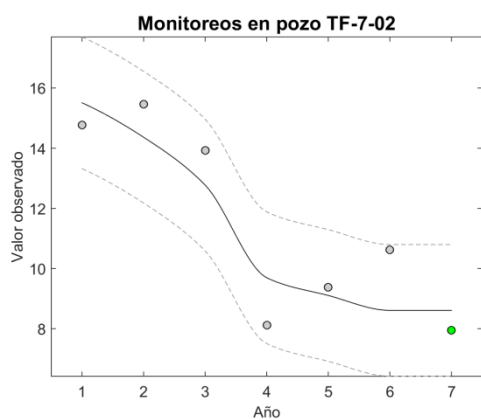
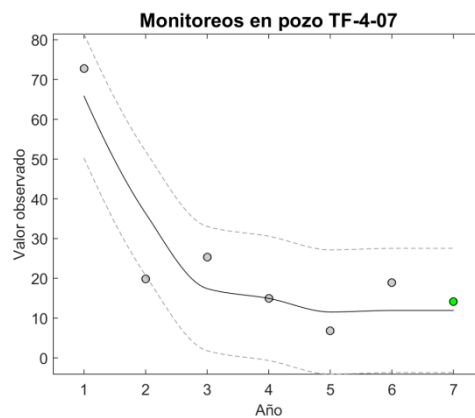
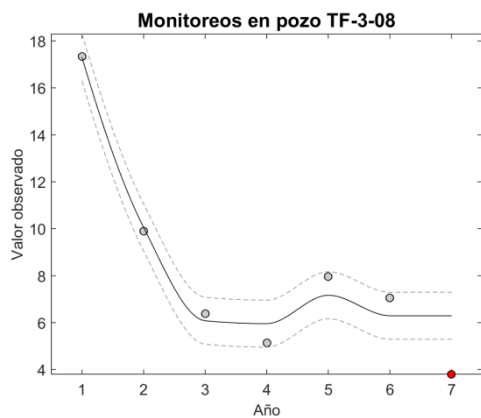
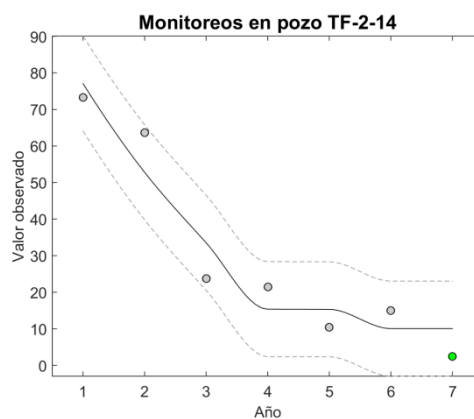
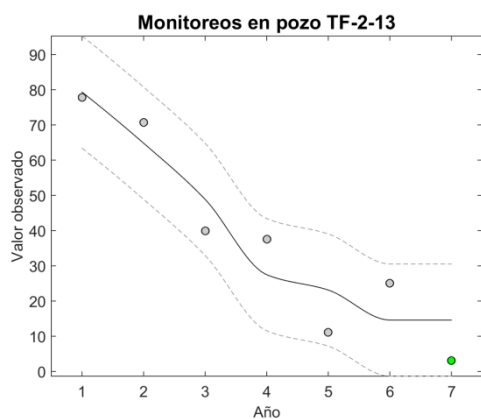
- Se calcula la varianza de los residuos (hasta el año 6).
- Se evalúa homocedasticidad de los residuos, es decir, que la varianza de los residuos se mantenga constante en el tiempo (se utiliza el test de Engle, 1988). Si existe homocedasticidad, puede considerarse que la varianza de los residuos se mantiene para toda la serie.
- Se asume que la tendencia se mantiene constante desde el año 6 al 7.
- Se calcula el rango entre la tendencia ajustada $\pm 1,64$ veces la desviación estándar³.
- Se comprueba que el último monitoreo se encuentre dentro del rango.

Los resultados de los pasos anteriores aplicados a los 8 casos en los que la serie no fue estacionaria se muestran en la Figura 2.

Figura 2. Evaluación de estabilidad en series no estacionarias.



³ Esto es válido dado que se chequeó homocedasticidad. De no existir homocedasticidad, otra metodología debe utilizarse (por ejemplo, estimando la varianza que debería existir al momento de lograr la estabilidad).



Fuente: Elaboración propia.

En el ejemplo, sólo el punto de monitoreo TF-3-08 no muestra estabilidad al año 7. Por lo tanto, al sólo existir sólo 1 punto sin estabilidad, no debe realizarse un estudio adicional de causalidad de tendencias, siempre y cuando el estudio de las tendencias previas ya se haya realizado (debido a que la cantidad de puntos no estacionarios es $8 > 7,5$ y que la cantidad de puntos en donde la tendencia continúa es $1 \leq 7,5$).

REFERENCIAS

Bendat J. y Piersol A. (2010). "Random Data: Analysis and Measurement Procedures". 4ª Ed. A John Wiley & Sons, Inc.

Engle, R. (1988). "Autoregressive Conditional Heteroscedasticity with Estimates of the Variance of United Kingdom Inflation." *Econometrica*. (96) 893–920.

2 Informe de análisis de metodologías de monitoreo de CE y pH

INFORME

Análisis Metodologías de Monitoreo de Conductividad Eléctrica y pH

Operación Salar de Atacama

M. Adriana Carrasco Rimassa
Químico MSc.
Especialista en Química de Suelos

2017

OBJETIVO

Analizar si las diferentes metodologías de monitoreo de conductividad eléctrica y pH realizado entre los años 2006 y 2016 en la operación minera de SQM Salar S.A. en el Salar de Atacama pudieron causar la variación en la salinidad y pH observada a partir del año 2012.

ANTECEDENTES

El monitoreo de conductividad eléctrica (CE) y de pH del suelo, efectuado en los sectores de seguimiento de la vegetación y flora del Borde Este, ha sido ejecutado por consultor externo a SQM Salar S.A. en los meses de abril de cada año, durante dos periodos de tiempo: uno entre 2006 y 2011 y otro entre 2012 y 2016, utilizando distintos métodos de medición entre ambos periodos. En el primero se utilizó un método de medición en terreno (en adelante método de terreno) y en el segundo se utilizó el método de CE en suspensión 1:2,5 (CES), el cual se realiza en laboratorio.

Los resultados del seguimiento indican que los valores de CE fueron considerablemente más altos a partir del año 2012 es decir durante el período de monitoreo efectuado con el método de CES. En el pH hubo una tendencia a valores más altos dependiendo del sitio de muestreo.

Se tuvo acceso a una validación de métodos mediante la ejecución de un muestreo de suelos, realizado en julio de 2017, para medir CE y pH, por ambos métodos.

MÉTODOS DE MEDICIÓN

Toma de muestras

La recolección de muestras fue efectuada por la empresa Geobiota durante todo el periodo de análisis (2006 hasta el 2016; y campaña 2017), manteniendo el mismo procedimiento. La toma de muestras consistió en la extracción de 500 g de suelo utilizando un barreno agrológico. Las muestras son representativas de la zona de mayor acumulación de raíces (suelo mineral superficial) y no contienen sal superficial (costra blanca).

Medición mediante método de terreno

Se midieron volumétricamente 500 g de suelo y se agregó agua destilada en proporción 1:2,5 (peso/volumen). La suspensión se agitó alrededor de 5 minutos, para luego medir en forma inmediata (alrededor de 10 minutos) la CE y el pH en la solución sobrenadante. Para medir el pH se utilizó el medidor de pH portátil HI 99121, y la CE se midió utilizando el conductímetro portátil HI 993310.

Medición mediante método de laboratorio (CES)

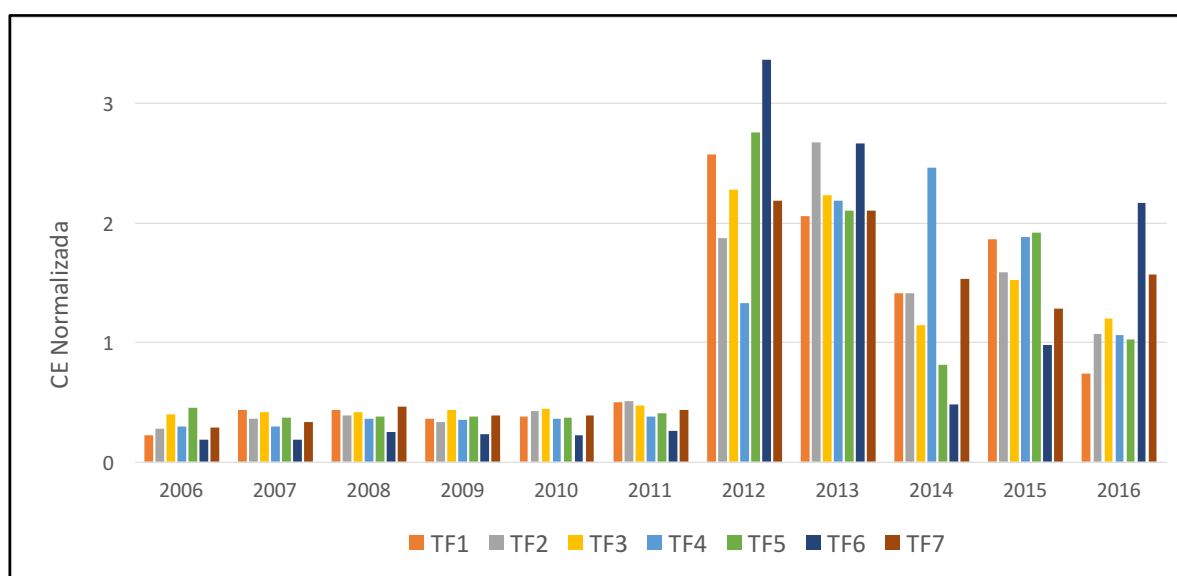
Las muestras extraídas fueron transportadas y almacenadas a 4°C en la oscuridad hasta su análisis en el laboratorio (Laboratorio de Servicios Agroanálisis, Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal de la Pontificia Universidad Católica). Una vez en el laboratorio, las muestras de suelo fueron secadas al aire y tamizadas (≤ 2 mm). Luego, se preparó una suspensión 1:2,5 (peso/volumen) utilizando agua destilada para medir la CE y una solución de KCl (1M), para medir el pH, respectivamente. La suspensión se mantiene en agitación por 1 hora, se deja decantar y se miden los parámetros.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

I. Conductividad eléctrica

La Tabla 1 muestra los resultados para la CE monitoreada, determinada entre los años 2006 y 2011 por el método de terreno y entre los años 2012 y 2016 por el método CES. Al normalizar las mediciones efectuadas cada año en cada uno de los siete transectos, por el promedio general del respectivo transecto, puede observarse que existe un cambio significativo entre el año 2011 y 2012 en todos los sitios (Figura 1). Este aumento, que coincide con el cambio de metodología, implica diferencias mayores al 1000% (Transecto 6; Figura 1). En la Figura 1 se puede notar que durante el periodo 2006 – 2011 no existieron grandes cambios y que, luego del aumento significativo observado entre el año 2011 y 2012 (periodo 2012 – 2016) los valores son mayores a los del periodo 2006-2011, y presentan también mayores fluctuaciones.

Figura 1. Evolución temporal de la conductividad eléctrica en los siete transectos de monitoreo de flora (TF). Los valores se encuentran normalizados por el promedio general determinado para cada transecto (periodo 2006-2016).



Fuente: Datos de los informes de seguimiento ambiental del Proyecto.

Dada la diferencia de los datos entre los dos periodos de monitoreo, para cada periodo se calcularon los valores promedios, valores mínimo y máximo, y la desviación estándar (DE) para cada sitio de observación (75 sitios de observación que se encuentran distribuidos en 7 transectos; Tabla 2). Comparando los promedios de CE, éstos fueron hasta diecisiete veces más altos en el periodo 2012-2016, sugiriendo que los datos obtenidos en terreno no son comparables directamente con los datos medidos por el método CES. Esto se reafirma por el hecho de que las desviaciones estándares de los métodos también presentan grandes diferencias. La desviación estándar de los datos medidos en terreno fue menor a 2 (1,1 en promedio) con excepción del Sitio TF5-03 con un valor de 17,5 (Tabla 2), mientras que la DE de los datos medidos mediante CES tendió a ser mucho más alta, fluctuando entre 1 y 70, con un promedio de 18,4. Esto indica que el método de terreno fue poco sensible a los cambios.

La diferencia entre ambos métodos se explicaría por las diferentes condiciones experimentales en las mediciones: preparación de la muestra; distintos tiempos de equilibrio y condiciones de preparación antes de proceder a las mediciones instrumentales; y posibles limitaciones de los equipos utilizados en terreno.

- **Preparación de la muestra:** En el método de CES las muestras se secan al aire y se tamizan a 2 mm. Esto implica una mayor proporción de suelo al preparar la muestra y por tanto se esperarían valores de CE más altos, especialmente en el caso de las muestras fuertemente salinas. En el método de terreno, de acuerdo a lo informado por la empresa encargada del muestreo y medición, no se tamizó a 2 mm y por tanto la posible presencia de gravas implicaría una menor proporción de suelo activo y una menor CE. Además, en terreno el suelo tampoco se seca previo a preparar la muestra. Por lo tanto, parte del peso del suelo utilizado para realizar la suspensión 1;2,5, corresponde en realidad a humedad y no a suelo propiamente tal. Esto disminuye más aún la cantidad de suelo que efectivamente se utiliza.
- **Tiempo de equilibrio y condiciones de agitación:** En el método de terreno la medición se realiza inmediatamente después de preparar la suspensión. En el método de CES, en cambio, se prepara la suspensión, se agita por 1 hora y se deja decantar antes de proceder a la medición instrumental de la CE. Los distintos tiempos de agitación y decantación entre ambos métodos llevan a condiciones de equilibrio químico diferentes, dado la presencia de sales muy solubles, medianamente solubles y muy poco solubles, lo cual explicaría que los resultados de CE medidos utilizando el método CES sean más altos.
- **Limitaciones de los equipos utilizados:** El conductivímetro utilizado en terreno fue un instrumento diseñado para caracterizar suelos agrícolas, y tiene un rango de medición de 0,00 a 19,99 mS/cm. Por ende, su rango es insuficiente para medir la CE en suelos altamente salinos, para los cuales debe utilizarse un equipo con amplio rango de lectura.

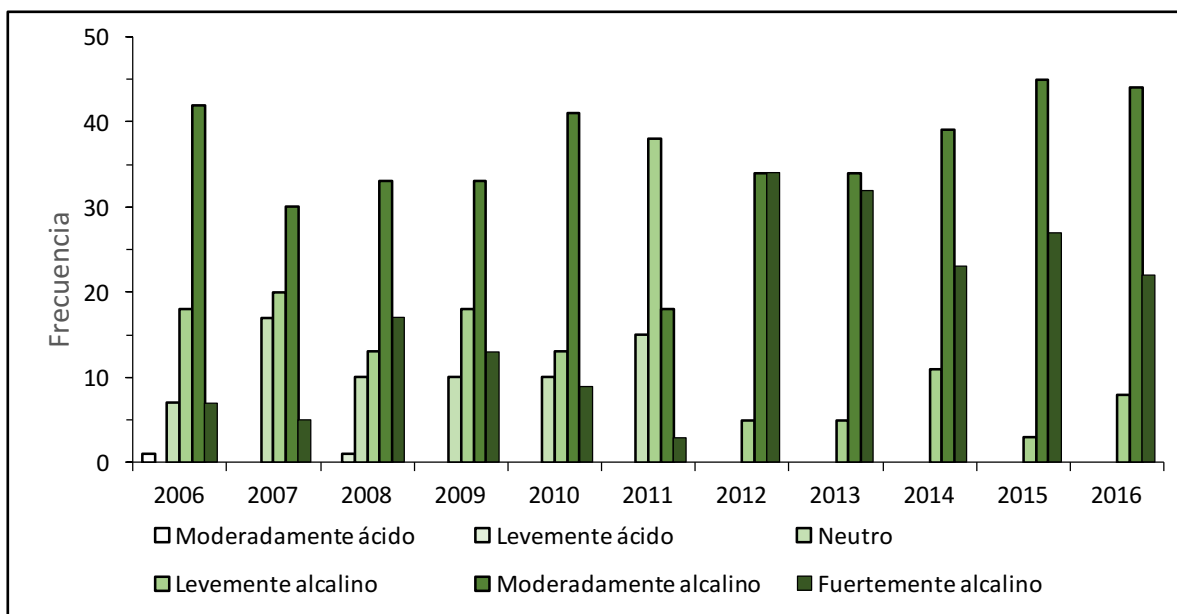
Al comparar la variabilidad de la CE entre los sitios medidos cada año en el periodo 2006-2011 con la variabilidad de la CE medida en el periodo 2012-2016 se observa una baja variabilidad en el primer periodo, con valores de desviación estándar (DE) que fluctúan entre 1,12 y 11,48 mientras que en el segundo periodo los valores fluctuaron entre 1,00 y 69,6 (Tabla 3). Esto indica que el método de terreno sería menos sensible a los cambios de CE, lo cual es corroborado por los resultados de CE medidos en un nuevo muestreo realizado, para validar los métodos de análisis, en julio de 2017 (Geobiota, 2017). En este muestreo se observa que los datos de terreno fueron más bajos y no fueron capaces de detectar cambios importantes en la CE cuando ésta era mayor de 20 mS/cm; esto se ve reflejado en una menor desviación estándar del método (Tabla 4). La incapacidad de detectar cambios importantes para CEs mayores a 20 mS/cm es probablemente debido a que estas mediciones se encuentran fuera del rango de medición del equipo.

Por lo tanto, el método de terreno no sería aplicable para detectar posibles cambios en la CE a través del tiempo por ser menos sensible a los cambios en terreno y a que el error experimental puede ser mayor que el efecto del año de muestreo. El método de la CES entrega valores de CE más altos y presenta desviaciones estándares más altas (Tabla 2) mostrando una mayor sensibilidad a las condiciones específicas del punto, período de medición y condiciones existentes al momento de efectuar el monitoreo, y a los cambios que puedan experimentarse en el tiempo.

II. Valores de pH

La Tabla 5 muestra los resultados para el pH monitoreado entre los años 2006 y 2011, medido por método de terreno y entre los años 2012 y 2016 medido en el laboratorio. Al analizar los datos por categoría de alcalinidad, se observa nuevamente un cambio de tendencia a partir del año 2012. Se observa que en esta fecha comienzan a predominar las categorías moderadamente y fuertemente alcalino sobre las categorías predominantes anteriormente (moderadamente alcalino). Sin embargo, este cambio no es tan evidente o significativo como el cambio observado en la CE.

Figura 2. Evolución temporal del pH en los 75 sitios de monitoreo.



Fuente: Datos de los informes de seguimiento ambiental del Proyecto.

Para analizar los datos según método de medición se calcularon los valores promedio, valores mínimo y máximo, y la desviación estándar (DE) para cada método y sitio de observación (Tabla 6).

Los valores promedios de pH según método de medición tendieron a ser más altos cuando el pH se midió en el laboratorio (Tabla 6). La desviación estándar de los resultados del pH medido por el método de terreno fluctuó entre 0,10 y 1,81 mientras que el método de laboratorio fluctuó entre 0,05 y 0,43 (Tabla 3). El valor mínimo de pH en terreno para el sitio TF-2-08 año 2010 fue 3,79 y para el sitio TF-4-02 año 2006 fue 5,87, ambos valores serían anómalos por alejarse de la tendencia de los valores de pH observada en el resto de los puntos. Al eliminarlos el valor mínimo sería 6,40 que está dentro de la tendencia del pH. Esto indicaría que los resultados medidos en terreno tuvieron una mayor variación a través del tiempo lo cual podría explicarse por las condiciones experimentales de preparación de las muestras para su análisis. Si bien ambos métodos dan resultados comparables, se debe tener presente que los métodos de terreno son estimativos y en el caso de un monitoreo en el tiempo es más recomendable utilizar un método de laboratorio.

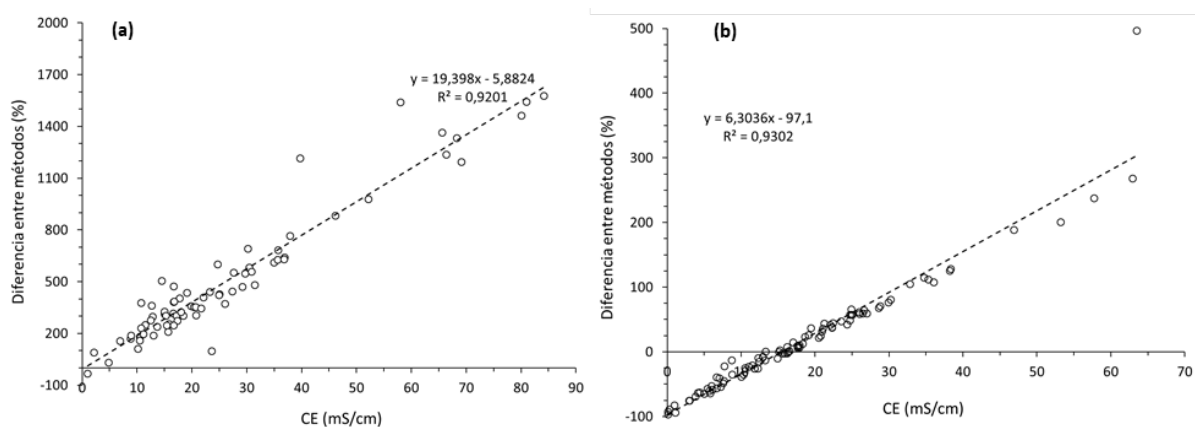
III. Validación de métodos (julio 2017)

En la validación de métodos realizada por Geobiota en el año 2017 se corroboran las tendencias de los resultados observados en el monitoreo realizado entre 2006 y 2016. En la Tabla 4 se observa que los valores máximos de CE son más altos para el método CES (resultados analíticos entregados por laboratorio UC). Se observa también que el método CES tiene una mayor sensibilidad a los cambios, si se comparan las desviaciones estándares de los métodos (Tabla 4). En el caso del pH, los distintos métodos arrojaron valores similares para los estadísticos medidos.

Si se comparan las diferencias porcentuales entre las conductividades medidas por el método de terreno y de laboratorio (respecto a las mediciones de terreno), se observa que tanto en los registros históricos del período 2006-2016¹, como en la campaña de 2017, estas diferencias se encuentran correlacionadas fuertemente con la CE del suelo ($R^2 > 0,92$; Figura 3).

Se observa que las diferencias porcentuales entre ambos métodos se incrementan en la medida que se comparan suelos de mayor salinidad, entregando consistentemente mayores conductividades eléctricas para las mediciones de laboratorio, con diferencias cercanas al 270% en una misma muestra para conductividades mayores de 65 mS/cm (Figura 3b), existiendo un registro puntual con diferencias del 500%. Por otra parte, estos resultados sugieren que los datos obtenidos utilizando la metodología de terreno, se podrían comparar con los de laboratorio realizando una conversión matemática.

Figura 3. Correlación entre la CE del suelo y las diferencias entre mediciones de CE utilizando métodos de terreno y laboratorio. (a) Las diferencias porcentuales corresponden a las diferencias entre los promedios para cada sitio en los periodos 2006 – 2011 (método de terreno) y 2012-2016 (método de laboratorio). (b) Las diferencias porcentuales corresponden a las diferencias entre las mediciones de terreno y laboratorio en la campaña de julio de 2017



Fuente: Datos de los informes de seguimiento ambiental del Proyecto y campaña realizada en 2017.

¹ Se determinó y comparó la diferencia en la CE para cada punto, obtenida como el promedio de las mediciones efectuadas en terreno (2006-2011) y las de laboratorio (2012-2016).

Conclusiones

La aplicación de distintos métodos de análisis para CE y pH se traduce en diferencias procedimentales e instrumentales que pueden hacer variar los resultados obtenidos para una misma muestra de suelo.

Las diferencias porcentuales en la CE obtenidas al comparar ambos métodos se encuentran fuertemente correlacionadas ($R^2 > 0,92$), incrementándose en la medida que se comparan suelos de mayor salinidad.

Para conductividades eléctricas del suelo mayores de 65 mS/cm las diferencias porcentuales entre métodos pueden alcanzar un 270%, siendo mayores las conductividades obtenidas con el método de laboratorio.

En el monitoreo de conductividad eléctrica y pH para detectar posibles cambios en el suelo a través del tiempo debieran considerarse métodos analíticos de laboratorio tanto para la conductividad eléctrica, como para el pH.

Tabla 1. Valores de CE durante el monitoreo realizado entre 2006 y 2016

Sitio	CE (mS/cm) método de terreno						CE(mS/cm) método de pasta saturada				
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
TF-1-01	0,44	0,9	2,1	2,1	2,3	0,8	0,9	0,2	0,1	2,6	1,1
TF-1-02	4,13	3,9	4,1	4,7	4,4	4,7	1,3	36,7	26,9	25,8	19,6
TF-1-03	3,1	3,4	3,5	4,7	4,9	5,7	9,4	48,1	40,5	12,8	27,1
TF-1-04	3,28	4,5	6,7	4,7	5,2	5,4	63,9	37,1	18,2	44,9	20,0
TF-1-05	2,56	4,5	5,3	4,4	4,7	5,4	132	104,8	29,8	35,5	25,8
TF-1-06	2,61	4,9	5,2	4,4	3,4	5,7	44,3	82	19,4	24,7	19,0
TF-1-07	1,3	4,1	5	2,8	2,6	5,4	160	60,8	14	46,2	9,0
TF-1-08	1,48	4,4	1,6	3,1	3,1	4,4	86,5	77,4	13,4	14,3	6,7
TF-1-09	2,12	4,3	3,2	2,8	3,1	5,2	18,8	12,8	14,3	31	6,5
TF-1-10	1,43	4,3	3,4	2,1	2,1	4,1	10,3	13,6	19,6	33	6,8
TF-1-11	1,58	4,4	4,5	2,3	1,6	5,2	15,6	6,4	7,5	11,9	2,6
TF-1-12	2,79	4,7	5,2	2,8	2,3	3,6	37,6	10,3	9,5	36,9	1,2
TF-1-13	1,04	3,9	4,4	3,4	3,6	5,4	12,5	21,7	18,8	13,9	8,2
TF-1-14	1,17	4,4	4,1	4,4	3,1	3,9	15,5	13,4	17,2	35,7	6,9
TF-1-15	1,68	3,9	2,3	1	1	3,6	27,7	5,9	11,7	6,6	1,8
TF-1-16	0,36	3,13	2,4	2,8	1,3	4,4	27,7	35,5	6,5	1,8	1,0
TF-1-17	2,25	4,3	3,4	2,6	3,1	5,4	15,1	22,5	16,1	11,6	9,5
TF-1-18	3,65	4	3	1,8	2,1	4,7	27,7	2,3	21,2	7	5,8
TF-1-19	2,79	4,2	2,7	2,1	4,5	5,4	8,6	1,3	3,3	8,9	1,8
TF-2-01	0,83	1,17	1,1	1	1,3	1,3	1,2	3,7	2,8	1,6	1,4
TF-2-02	0,7	3,8	3,9	4,7	4,1	5,2	1,3	5,3	19,5	17,2	9,1
TF-2-03	3,92	4,6	3,4	4,1	4,7	5,2	3,9	24,1	29,9	14,2	26,9
TF-2-04	3,75	4,6	4,8	3,9	4,9	4,9	5,2	43,2	27,4	14,5	11,5
TF-2-05	3,8	4,4	4,5	4,1	5,2	5,4	10,7	41,2	15,3	51,4	
TF-2-06	4,1	4,2	5,2	3,9	5,2	5,7	17,7	35,5	10,8	28,1	32,8
TF-2-07	3,3	4,2	5	4,1	4,4	5,7	29,8	19,4	6,9	5,1	17,3
TF-2-08	2,59	2,3	2,3	2,3	5,4	5,7	17,6	37	2,2	7,9	18,8
TF-2-09	2,46	3,9	4,3	1,6	5,2	6,5	38,4	14	7,3	13,8	9,5
TF-2-10	1,45	3,9	2,9	1,6	2,1	4,4	12,9	17,9	12,8	16,9	2,6
TF-2-11	3,54	2,2	4,5	3,9	3,4	4,9	13,6	16,5	7,2	12,2	3,4
TF-2-12	2,89	2,8	4	3,1	4,9	5,2	12,8	124,5	4,6	7,2	2,0
TF-2-13	3,94	4,6	5,6	4,1	5,4	5,9	137	112	70,2	66	19,5
TF-2-14	3,46	3,6	4,8	5,9	5,2	5,2	129	4	41,7	37,8	18,3
TF-3-01	4,8	4	4,3	4,1	5,2	3,1	5,2	46,5	8,5	21,3	4,3
TF-3-02	4,49	4,2	4,5	4,1	4,1	5,4	23,3	39,8	12,5	53,4	23,3
TF-3-03	4,2	3,9	4,5	3,9	5,2	5,7	32,8	22,4	10,9	18,3	7,7
TF-3-04	3,49	4,7	4,3	4,7	4,9	5,2	26,4	45	12	12,7	7,3
TF-3-05	4,32	4,8	4,4	1,6	4,9	5,7	27,1	20,1	25,7	11,6	31,6
TF-3-06	3,78	4,2	3,2	4,4	3,9	4,7	13,8	8	10,1	9,7	10,6
TF-3-07	3,96	3,4	4,7	4,4	5,2	5,4	15,6	17,4	13,5	11,4	7,0
TF-3-08	3,15	3,8	3,3	4,9	3,6	3,9	30,5	11,6	11,2	9	14,0
TF-3-09	4,27	4,5	4	5,7	3,9	4,4	23,6	31,7	7,6	8,9	7,4
TF-3-10	4,49	5,4	5,4	5,4	4,7	4,7	37,9	0,9	7,4	15	16,9

(continúa)

Tabla 1. Continuación

Sitio	CE (mS/cm) método de terreno						CE(mS/cm) método de pasta saturada				
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
TF-4-01	2,28	1,5	3,4	2,6	3,1	3,1	0,7	6,8	26	0,5	0,2
TF-4-02	4,61	4,6	4,5	4,9	4,4	3,6	6,2	18,4	47,5	3,4	1,6
TF-4-03	4,18	5,1	4,5	5,2	4,7	4,4	5,1	32,2	73,8	36,5	6,5
TF-4-04	3,72	5,1	5,1	4,9	5,4	5,2	26,9	11,6	35,5	56,4	44,2
TF-4-05	3,96	4,3	4,3	4,9	5,2	5,9	3,1	47	9,8	45,3	19,2
TF-4-06	4,59	3,9	5	5,2	5,2	6,2	25,6	35	2,1	34,7	39,3
TF-4-07	4,2	3,8	4,8	3,9	5,4	6,5	128	130,4	44,5	26,3	12,0
TF-4-08	3,99	4,1	5,3	5,4	5,2	6,7	42,1	28,5	17	34,8	23,5
TF-4-09	4,87	4,8	5,8	5,7	5,7	6,2	16,4	34,2	27,8	40,4	11,4
TF-5-01	2,41	4,2	5,5	4,9	5,4	5,4	0,2	4,7	21	31,3	29,3
TF-5-02	3,17	4,6	5,2	5,2	5,4	5,2	19,4	26,6	17,8	6,9	12,4
TF-5-03	47,51	4,9	5,1	3,6	4,4	5,4	21,4	21,5	15	49,4	10,7
TF-5-04	3,87	5,7	5	5,2	5,4	5,4	3,4	67,9	8,6	15,2	8,6
TF-5-05	4,41	5	5,7	5,7	5,7	5,9	40,6	46,2	13,7	23,9	32,8
TF-5-06	2,61	4,7	5,5	5,7	5,7	5,9	135	123,4	17,4	108,4	36,6
TF-5-07	4,74	4,7	5,6	4,4	5,4	5,9	176	129,3	14,4	30,4	50,1
TF-5-08	4,44	4,2	4,2	3,6	5,2	5,7	88,7	47,5	6,7	22,7	12,7
TF-5-09	1,99	3,6	3,8	3,9	3,9	3,9	71,5	22,8	4	16,4	8,7
TF-5-10	2,66	3,9	4,9	1,8	2,8	3,6	12,7	10,9	12,1	18,3	3,4
TF-5-11	1,55	4	3,4	4,1	1,8	3,6	20	4,9	3,2	11,5	4,9
TF-5-12	2,86	2,3	2,1	4,1	3,9	4,1	21,5	5,1	4	18,5	4,5
TF-5-13	3,2	4,3	2,9	4,4	3,9	3,9	19,8	6,1	2,9	22,2	4,7
TF-5-14	3,99	3,9	4,4	4,4	4,1	4,7	37,3	23,9	5,5	13,7	9,5
TF-6-01	4,54	3,8	5,4	5,4	4,9	5,7	132	111,8	9,1	19,3	59,4
TF-6-02	3,78	4,7	5,6	4,4	5,2	5,7	65,3	33	9,1	25,9	44,6
TF-6-03	4,51	3,7	5,7	5,7	4,7	5,9	51,1	55,3	13,2	19	45,2
TF-7-01	4,91	5,2	5,4	5,4	5,2	5,9	64,5	112,9	45,7	47,7	74,5
TF-7-02	3,67	4,5	5,7	5,2	4,4	5,7	26	27,2	24,5	14,3	16,5
TF-7-03	3,75	4,2	5,5	5,2	4,9	5,4	95,8	26,3	81,8	22,1	34,6
TF-7-04	1,99	2,3	5,2	2,8	2,1	5,4	10,5	12,2	4,3	15,1	20,1
TF-7-05	3,36	3,1	5,4	3,6	4,7	3,9	13,1	27,1	6,9	11,1	10,0
TF-7-06	3,56	4,7	4,7	5,7	5,7	4,4	18,4	9,2	10,3	7,2	5,4

Fuente: Datos de los informes de seguimiento ambiental del Proyecto.

Tabla 2. Estadísticos para conductividad eléctrica medida por distintos métodos entre 2006 y 2016

CE (mS/cm) método de terreno, periodo 2006-2011					CE (mS/cm) método pasta saturada 2012-2016				
Sitio	Promedio	Mínima	Máxima	DE	Sitio	Promedio	Mínima	Máxima	DE
TF-1-01	1,44	0,44	2,3	0,81	TF-1-01	1,0	0,10	2,6	1,0
TF-1-02	4,32	3,9	4,7	0,33	TF-1-02	22,1	1,30	36,7	13,1
TF-1-03	4,22	3,1	5,7	1,03	TF-1-03	27,6	9,40	48,1	16,9
TF-1-04	4,96	3,28	6,7	1,13	TF-1-04	36,8	18,20	63,9	18,9
TF-1-05	4,48	2,56	5,4	1,03	TF-1-05	65,6	25,84	132	49,3
TF-1-06	4,37	2,61	5,7	1,16	TF-1-06	37,9	18,97	82	26,7
TF-1-07	3,53	1,3	5,4	1,57	TF-1-07	58,0	9,00	160	61,0
TF-1-08	3,01	1,48	4,4	1,28	TF-1-08	39,7	6,68	86,5	38,9
TF-1-09	3,45	2,12	5,2	1,11	TF-1-09	16,7	6,49	31	9,1
TF-1-10	2,91	1,43	4,3	1,19	TF-1-10	16,7	6,83	33	10,3
TF-1-11	3,26	1,58	5,2	1,62	TF-1-11	8,8	2,55	15,6	5,1
TF-1-12	3,57	2,3	5,2	1,16	TF-1-12	19,1	1,16	37,6	17,0
TF-1-13	3,62	1,04	5,4	1,45	TF-1-13	15,0	8,20	21,7	5,3
TF-1-14	3,51	1,17	4,4	1,24	TF-1-14	17,7	6,89	35,7	10,8
TF-1-15	2,25	1	3,9	1,26	TF-1-15	10,7	1,84	27,7	10,1
TF-1-16	2,40	0,36	4,4	1,42	TF-1-16	14,5	0,98	35,5	16,0
TF-1-17	3,51	2,25	5,4	1,17	TF-1-17	15,0	9,46	22,5	5,0
TF-1-18	3,21	1,8	4,7	1,12	TF-1-18	12,8	2,30	27,7	11,0
TF-1-19	3,62	2,1	5,4	1,27	TF-1-19	4,8	1,30	8,9	3,7
TF-2-01	1,12	0,83	1,3	0,18	TF-2-01	2,1	1,20	3,7	1,1
TF-2-02	3,73	0,7	5,2	1,58	TF-2-02	10,5	1,30	19,5	7,7
TF-2-03	4,32	3,4	5,2	0,64	TF-2-03	19,8	3,90	29,9	10,7
TF-2-04	4,48	3,75	4,9	0,52	TF-2-04	20,4	5,20	43,2	15,1
TF-2-05	4,57	3,8	5,4	0,62	TF-2-05	29,65	10,7	51,4	19,8
TF-2-06	4,72	3,9	5,7	0,74	TF-2-06	25,0	10,80	35,5	10,4
TF-2-07	4,45	3,3	5,7	0,82	TF-2-07	15,7	5,10	29,8	10,1
TF-2-08	3,43	2,3	5,7	1,65	TF-2-08	16,7	2,20	37	13,3
TF-2-09	3,99	1,6	6,5	1,78	TF-2-09	16,6	7,30	38,4	12,5
TF-2-10	2,73	1,45	4,4	1,22	TF-2-10	12,6	2,61	17,9	6,1
TF-2-11	3,74	2,2	4,9	0,95	TF-2-11	10,6	3,40	16,5	5,2
TF-2-12	3,82	2,8	5,2	1,05	TF-2-12	30,2	2,03	124,5	52,9
TF-2-13	4,92	3,94	5,9	0,82	TF-2-13	80,9	19,48	137	45,3
TF-2-14	4,69	3,46	5,9	0,97	TF-2-14	46,2	4,00	129	18,3
TF-3-01	4,25	3,1	5,2	0,72	TF-3-01	17,2	4,27	46,5	17,8
TF-3-02	4,47	4,1	5,4	0,49	TF-3-02	30,5	12,50	53,4	16,1
TF-3-03	4,57	3,9	5,7	0,74	TF-3-03	18,4	7,74	32,8	9,9
TF-3-04	4,55	3,49	5,2	0,60	TF-3-04	20,7	7,26	45	15,4
TF-3-05	4,29	1,6	5,7	1,40	TF-3-05	23,2	11,60	31,6	7,7
TF-3-06	4,03	3,2	4,7	0,53	TF-3-06	10,4	8,00	13,8	2,1
TF-3-07	4,51	3,4	5,4	0,76	TF-3-07	13,0	6,99	17,4	4,0
TF-3-08	3,78	3,15	4,9	0,62	TF-3-08	15,3	9,00	30,5	8,7
TF-3-09	4,46	3,9	5,7	0,65	TF-3-09	15,8	7,43	31,7	11,2
TF-3-10	5,02	4,49	5,4	0,43	TF-3-10	15,6	0,90	37,9	14,0

(continúa)

Tabla 2. Continuación

Sitio	Promedio	Mínima	Máxima	DE	Sitio	Promedio	Mínima	Máxima	DE
TF-4-01	2,66	1,5	3,4	0,70	TF-4-01	6,8	0,15	26	11,1
TF-4-02	4,44	3,6	4,9	0,44	TF-4-02	15,4	1,59	47,5	19,1
TF-4-03	4,68	4,18	5,2	0,40	TF-4-03	30,8	5,10	73,8	28,0
TF-4-04	4,90	3,72	5,4	0,60	TF-4-04	34,9	11,60	56,4	17,0
TF-4-05	4,76	3,96	5,9	0,72	TF-4-05	24,9	3,10	47	20,2
TF-4-06	5,02	3,9	6,2	0,76	TF-4-06	27,3	2,10	39,3	15,0
TF-4-07	4,77	3,8	6,5	1,04	TF-4-07	68,2	12,00	130,4	56,8
TF-4-08	5,12	3,99	6,7	0,99	TF-4-08	29,2	17,00	42,1	9,7
TF-4-09	5,51	4,8	6,2	0,56	TF-4-09	26,0	11,39	40,4	12,1
TF-5-01	4,64	2,41	5,5	1,19	TF-5-01	17,3	0,20	31,3	14,2
TF-5-02	4,80	3,17	5,4	0,84	TF-5-02	16,6	6,90	26,6	7,4
TF-5-03	11,82	3,6	47,51	17,50	TF-5-03	23,6	10,73	49,4	15,1
TF-5-04	5,10	3,87	5,7	0,64	TF-5-04	20,7	3,40	67,9	26,7
TF-5-05	5,40	4,41	5,9	0,58	TF-5-05	31,4	13,70	46,2	13,0
TF-5-06	5,02	2,61	5,9	1,25	TF-5-06	84,2	17,40	135	53,5
TF-5-07	5,12	4,4	5,9	0,59	TF-5-07	80,0	14,40	176	69,5
TF-5-08	4,56	3,6	5,7	0,76	TF-5-08	35,7	6,70	88,7	33,5
TF-5-09	3,52	1,99	3,9	0,76	TF-5-09	24,7	4,00	71,5	27,1
TF-5-10	3,28	1,8	4,9	1,09	TF-5-10	11,5	3,41	18,3	5,3
TF-5-11	3,08	1,55	4,1	1,12	TF-5-11	8,9	3,20	20	7,0
TF-5-12	3,23	2,1	4,1	0,92	TF-5-12	10,7	4,00	21,5	8,6
TF-5-13	3,77	2,9	4,4	0,60	TF-5-13	11,1	2,90	22,2	9,1
TF-5-14	4,25	3,9	4,7	0,30	TF-5-14	18,0	5,50	37,3	12,8
TF-6-01	4,96	3,8	5,7	0,70	TF-6-01	66,3	9,10	132	54,6
TF-6-02	4,90	3,78	5,7	0,74	TF-6-02	35,6	9,10	65,3	21,0
TF-6-03	5,04	3,7	5,9	0,87	TF-6-03	36,8	13,20	55,3	19,3
TF-7-01	5,34	4,91	5,9	0,33	TF-7-01	69,1	45,70	112,9	27,3
TF-7-02	4,86	3,67	5,7	0,81	TF-7-02	21,7	14,30	27,2	5,9
TF-7-03	4,83	3,75	5,5	0,70	TF-7-03	52,1	22,10	95,8	34,1
TF-7-04	3,30	1,99	5,4	1,58	TF-7-04	12,4	4,30	20,1	5,8
TF-7-05	4,01	3,1	5,4	0,88	TF-7-05	13,6	6,90	27,1	7,9
TF-7-06	4,79	3,56	5,7	0,82	TF-7-06	10,1	5,43	18,4	5,0

Fuente: Datos de los informes de seguimiento ambiental del Proyecto.

Tabla 3. Valores mínimos y máximos para los estadísticos de los valores de CE y pH medidos entre 2006 y 2016, según método de medición.

CE método terreno			CE método CES	
Estadístico	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima
Promedio	1,12	11,82	1,00	69,6
Mínima	0,36	4,91	0,10	45,7
Máxima	1,30	47,5	2,60	176
Desviación estándar	0,18	17,50	1,00	69,5
pH método terreno			pH método de laboratorio	
Estadístico	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Promedio	6,99	8,66	7,70	8,83
Mínima	3,79	7,72	7,40	8,60
Máxima	7,27	9,04	7,80	9,20
Desviación estándar	0,1	1,81	0,05	0,43

Fuente: Datos de los los informes de seguimiento ambiental del Proyecto.

Tabla 4. Estadísticos para CE y pH medidos por Geobiota en 2017, considerando todos los sitios de muestreo.

CE (mS/cm)		
Estadístico	Lab. UC	Método terreno
Promedio	18,35	14,67
Mínima	0,07	0,95
Máxima	63,5	17,7
Desviación estándar	13,05	3,08
pH		
Estadístico	Lab. UC	Método terreno
Promedio	8,8	8,59
Mínima	7,21	7,25
Máxima	9,7	9,26
Desviación estándar	0,35	0,28

Fuente: Datos de resultados de la campaña realizada en 2017.

Tabla 5. Valores de pH durante el monitoreo realizado entre 2006 y 2016

Sitio	Método de terreno						Método de laboratorio				
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
TF-1-01	8,5	8,5	8,44	8,66	8,62	8,41	8,2	7,4	7,99	7,91	7,86
TF-1-02	7,45	8,2	8,41	8,36	8,38	7,88	8,3	8,5	8,56	8,69	8,56
TF-1-03	8	8,4	8,44	8,33	8,28	7,91	8,4	8,8	8,78	8,82	8,82
TF-1-04	7,61	6,92	6,86	7,33	6,91	7,27	8,5	8,1	8,42	8,48	8,56
TF-1-05	7,91	7,03	7,9	8,24	7,82	7,71	8	8,4	8,4	8,31	8,42
TF-1-06	7,62	7,28	8,55	8,5	8,4	7,76	8,6	8,3	8,59	8,35	8,39
TF-1-07	8,12	7,25	8,02	8,57	8,48	7,69	8	8,4	8,56	8,4	8,67
TF-1-08	7,9	7,9	8,51	8,07	8,42	7,85	8,5	8,3	8,49	8,09	8,67
TF-1-09	7,98	8,04	8,4	8,17	8,15	7,85	8,5	8,6	8,4	8,44	8,32
TF-1-10	8,06	7,81	8,71	8,34	8,22	7,63	8,4	8,1	8,25	8,46	8,42
TF-1-11	8,11	8	8,75	8,76	8,49	7,87	8,5	8,1	8,21	8,04	8,07
TF-1-12	7,93	7,87	8,04	8,4	8,23	7,87	8,7	8	8,1	8,09	7,94
TF-1-13	8,25	7,89	8,35	8,67	8,71	7,89	8,3	8,2	8,51	8,01	8,18
TF-1-14	8,18	7,89	8,47	8,1	8,23	7,77	8,6	8,3	8,53	8,55	8,49
TF-1-15	8,17	8,18	8,28	8,34	8,36	8,11	8,7	8,2	8,42	8,19	7,9
TF-1-16	8,49	8,49	8,6	8,77	8,56	8,39	8,8	8,9	8,37	8,03	7,96
TF-1-17	8,42	8,48	8,89	8,45	8,55	8,49	8,8	8,6	8,84	8,66	8,78
TF-1-18	8,48	8,59	9,04	8,61	8,79	8,46	8,7	8,2	8,88	8,17	8,33
TF-1-19	8,25	8,18	9,04	8,82	8,33	8,09	8,5	8,1	8,7	8,46	8,31
TF-2-01	7,53	7,7	7,65	7,84	7,52	7,21	8,1	8,2	7,47	7,96	8,12
TF-2-02	7,74	7,84	8,36	7,54	8,1	7,59	8,4	8,8	8,26	8,3	7,85
TF-2-03	7,23	7,38	8,46	7,54	8,07	7,45	8	8,6	8,14	8,48	8,12
TF-2-04	7,69	7,28	8,36	6,8	8,24	7,79	8,2	8,3	8,37	8,87	7,96
TF-2-05	7,47	7,76	7,9	8	7,82	7,46	8,3	8,8	8,41	8,59	8
TF-2-06	7,92	7,88	7,6	8,25	7,27	7,43	8,6	8,6	8,39	8,44	8,66
TF-2-07	8,03	7,71	8,07	8,37	8,1	7,21	8,4	8,6	8,42	8,3	8,81
TF-2-08	8,02	8,38	8,51	8,26	3,79	7,61	8,8	8,7	8,11	8,72	8,83
TF-2-09	8,21	8,28	7,75	8,42	7,93	7,51	8,7	8,3	8	8,69	8,84
TF-2-10	8,1	7,77	8,35	8,28	8,19	8,01	8,7	8,1	8,52	8,57	8,23
TF-2-11	8,07	8,02	8,28	8,29	8	7,94	8,2	7,7	8,14	8,19	8,15
TF-2-12	8	7,35	8,66	7,43	7,92	7,82	8,1	8	7,85	7,76	7,73
TF-2-13	8,08	7,81	7,87	8,36	7,99	7,56	7,9	7,8	7,97	7,98	7,93
TF-2-14	8,14	8,03	8,58	8,54	8,1	7,93	8	7,8	8,12	8,16	8,05
TF-3-01	8,04	7,56	7,8	7,84	7,34	7,65	7,9	8,2	7,98	8,25	8,08
TF-3-02	7,27	7,18	6,63	7,09	6,79	6,98	8,2	8,6	8,16	8,05	8,03
TF-3-03	8,04	7,95	7,94	8,29	8,01	7,47	8,5	8,5	8,33	8,3	8,1
TF-3-04	8,18	7,3	8,05	8,15	7,7	7,57	8,4	8,4	8,17	8,28	8,15
TF-3-05	7,35	7,27	7,17	7,4	7,62	7,2	8,4	8,8	8,38	8,43	8,62
TF-3-06	8,64	8,35	8,31	8,4	8,28	8,34	9,2	9	8,71	8,7	8,56
TF-3-07	8,5	8,38	8,17	8,13	8,13	8,15	8,9	7,9	8,13	8,54	8,01
TF-3-08	8,04	7,91	8,12	8,2	8,16	7,68	7,8	7,7	8,02	7,85	8
TF-3-09	7,52	7,52	7,87	7,71	7,8	7,71	7,7	7,7	7,8	7,82	7,74
TF-3-10	7,65	7,2	7,47	7,36	7,51	7,3	7,6	8,4	7,69	7,82	7,71

Continúa

Tabla 5. Continuación

Sitio	Método de terreno						Método de laboratorio				
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
TF-4-01	8,29	8,28	8,25	7,79	8,19	7,29	8,9	8,5	7,8	8,42	8,48
TF-4-02	5,87	7,66	8,38	7,45	7,96	7,81	8,6	8,5	8,08	8,35	7,81
TF-4-03	7,7	7,29	7,64	6,73	7,08	7,82	8,1	8,3	8,15	8,33	8,18
TF-4-04	7,27	6,53	7,58	7,28	6,97	7,6	8,3	8,5	8,3	8,22	8,33
TF-4-05	7,62	7,32	7,99	7,11	7,75	7,5	8,1	8,3	8,13	8,28	8,28
TF-4-06	7,62	7,06	7,09	7,58	7,31	6,77	8,3	8,3	8,72	8,18	8,03
TF-4-07	7,83	7,64	7,91	8,1	7,71	7,33	8,2	7,9	8,08	8,4	8,07
TF-4-08	7,78	7,62	7,74	8,05	7,84	7,29	8,3	8,6	8,15	8,13	8,07
TF-4-09	7,77	7,35	7,69	7,46	7,43	7,65	8,1	8,1	8,17	8,25	8
TF-5-01	8,29	8,25	8,15	8,13	7,9	7,69	8,3	8,1	8,44	8,37	8,37
TF-5-02	8,52	7,64	8,2	7,78	7,89	7,77	8,7	8,6	8,41	8,63	8,63
TF-5-03	7,85	7,89	8,19	7,95	7,83	7,53	8,3	8,3	8,38	8,44	8,4
TF-5-04	8,2	7,36	8,21	8,07	7,25	7,55	8,3	8,4	8,36	8,41	7,99
TF-5-05	7,28	7,07	7,38	7,18	6,87	6,82	8,3	8,5	8,01	8,16	8,22
TF-5-06	7,27	6,86	6,4	7,65	7,05	6,82	8,1	7,9	8,1	7,66	7,89
TF-5-07	7,98	7,66	6,88	8,17	7,06	7,22	8,2	8,2	7,95	8,11	7,98
TF-5-08	7,85	7,25	7,85	7,74	7,88	7,43	8,5	8,3	7,75	7,94	7,8
TF-5-09	8,17	7,77	7,99	7,77	8,14	7,49	8,3	8,1	7,66	8	7,85
TF-5-10	7,94	7,8	7,84	8,16	8,26	7,41	8,3	8,2	7,85	7,88	7,77
TF-5-11	8,13	7,67	8,13	8,03	8,31	7,55	8,2	8,1	7,67	7,97	7,84
TF-5-12	7,93	7,96	8,16	7,83	7,98	7,63	8,2	8	7,64	7,93	7,82
TF-5-13	7,98	7,64	7,95	7,77	8	7,71	7,7	8	7,73	7,9	7,65
TF-5-14	8,05	8	7,94	8,13	8,19	7,72	7,8	7,8	7,77	7,77	7,68
TF-6-01	7,02	7,85	7,29	7,11	7,68	7,34	8,4	8,4	7,78	8,09	8,56
TF-6-02	7,35	7,18	7,15	7,94	7,14	7,56	8,6	8,4	7,82	8,48	8,29
TF-6-03	7,52	8,3	7,06	7,05	7,81	7,2	8,3	8,3	8,04	8,21	8,24
TF-7-01	6,51	7,3	7,01	7,09	7,61	7,2	8,5	8,4	8,25	8,72	8,44
TF-7-02	8,28	7,08	7,05	7,7	8,18	6,73	8,6	8,7	8,71	8,83	8,48
TF-7-03	8,34	7,82	7,64	7,54	7,99	7,41	8,4	8,4	8,58	8,25	8,15
TF-7-04	8,17	7,91	7,74	8,11	8,02	7,47	8,2	8,5	7,89	7,98	8,43
TF-7-05	7,94	7,69	7,36	7,8	7,66	7,27	7,6	7,8	7,71	7,98	7,78
TF-7-06	7,71	7,23	7,66	7,05	7,69	7,67	7,7	7,7	7,67	7,85	7,64

Fuente: Datos de los informes de seguimiento ambiental del Proyecto.

Tabla 6 . Estadísticos para pH medido por distintos métodos entre 2006 y 2016

pH método de terreno, periodo 2006-2011					pH método laboratorio, periodo 2012-2016				
Sitio	Promedio	Mínima	Máxima	DE	Sitio	Promedio	Mínima	Máxima	DE
TF-1-01	8,52	8,41	8,66	0,099	TF-1-01	7,87	7,4	8,2	0,294
TF-1-02	8,11	7,45	8,41	0,380	TF-1-02	8,52	8,3	8,69	0,142
TF-1-03	8,23	7,91	8,44	0,219	TF-1-03	8,72	8,4	8,82	0,182
TF-1-04	7,15	6,86	7,61	0,301	TF-1-04	8,41	8,1	8,56	0,181
TF-1-05	7,77	7,03	8,24	0,403	TF-1-05	8,31	8	8,42	0,176
TF-1-06	8,02	7,28	8,55	0,535	TF-1-06	8,45	8,3	8,6	0,140
TF-1-07	8,02	7,25	8,57	0,495	TF-1-07	8,41	8	8,67	0,254
TF-1-08	8,11	7,85	8,51	0,288	TF-1-08	8,41	8,09	8,67	0,222
TF-1-09	8,10	7,85	8,4	0,189	TF-1-09	8,45	8,32	8,6	0,105
TF-1-10	8,13	7,63	8,71	0,386	TF-1-10	8,33	8,1	8,46	0,149
TF-1-11	8,33	7,87	8,76	0,389	TF-1-11	8,18	8,04	8,5	0,188
TF-1-12	8,06	7,87	8,4	0,216	TF-1-12	8,17	7,94	8,7	0,306
TF-1-13	8,29	7,89	8,71	0,359	TF-1-13	8,24	8,01	8,51	0,183
TF-1-14	8,11	7,77	8,47	0,250	TF-1-14	8,49	8,3	8,6	0,115
TF-1-15	8,24	8,11	8,36	0,101	TF-1-15	8,28	7,9	8,7	0,298
TF-1-16	8,55	8,39	8,77	0,129	TF-1-16	8,41	7,96	8,9	0,430
TF-1-17	8,55	8,42	8,89	0,174	TF-1-17	8,74	8,6	8,84	0,101
TF-1-18	8,66	8,46	9,04	0,220	TF-1-18	8,46	8,17	8,88	0,317
TF-1-19	8,45	8,09	9,04	0,385	TF-1-19	8,41	8,1	8,7	0,224
TF-2-01	7,58	7,21	7,84	0,214	TF-2-01	7,97	7,47	8,2	0,293
TF-2-02	7,86	7,54	8,36	0,315	TF-2-02	8,32	7,85	8,8	0,340
TF-2-03	7,69	7,23	8,46	0,474	TF-2-03	8,27	8	8,6	0,258
TF-2-04	7,69	6,8	8,36	0,587	TF-2-04	8,34	7,96	8,87	0,334
TF-2-05	7,74	7,46	8	0,224	TF-2-05	8,42	8	8,8	0,302
TF-2-06	7,73	7,27	8,25	0,360	TF-2-06	8,54	8,39	8,66	0,116
TF-2-07	7,92	7,21	8,37	0,404	TF-2-07	8,51	8,3	8,81	0,201
TF-2-08	7,43	3,79	8,51	1,810	TF-2-08	8,63	8,11	8,83	0,297
TF-2-09	8,02	7,51	8,42	0,348	TF-2-09	8,51	8	8,84	0,347
TF-2-10	8,12	7,77	8,35	0,209	TF-2-10	8,42	8,1	8,7	0,250
TF-2-11	8,10	7,94	8,29	0,149	TF-2-11	8,08	7,7	8,2	0,212
TF-2-12	7,86	7,35	8,66	0,471	TF-2-12	7,89	7,73	8,1	0,158
TF-2-13	7,95	7,56	8,36	0,270	TF-2-13	7,92	7,8	7,98	0,072
TF-2-14	8,22	7,93	8,58	0,273	TF-2-14	8,03	7,8	8,16	0,141
TF-3-01	7,71	7,34	8,04	0,244	TF-3-01	8,08	7,9	8,25	0,146
TF-3-02	6,99	6,63	7,27	0,243	TF-3-02	8,21	8,03	8,6	0,231
TF-3-03	7,95	7,47	8,29	0,268	TF-3-03	8,35	8,1	8,5	0,166
TF-3-04	7,83	7,3	8,18	0,357	TF-3-04	8,28	8,15	8,4	0,120
TF-3-05	7,34	7,17	7,62	0,165	TF-3-05	8,53	8,38	8,8	0,180
TF-3-06	8,39	8,28	8,64	0,130	TF-3-06	8,83	8,56	9,2	0,260
TF-3-07	8,24	8,13	8,5	0,158	TF-3-07	8,30	7,9	8,9	0,415
TF-3-08	8,02	7,68	8,2	0,195	TF-3-08	7,87	7,7	8,02	0,136
TF-3-09	7,69	7,52	7,87	0,144	TF-3-09	7,75	7,7	7,82	0,056
TF-3-10	7,42	7,2	7,65	0,161	TF-3-10	7,84	7,6	8,4	0,321

(continúa)

Tabla 6. Continuación

Sitio	Promedio	Mínima	Máxima	DE	Sitio	Promedio	Mínima	Máxima	DE
TF-4-01	8,02	7,29	8,29	0,402	TF-4-01	8,42	7,8	8,9	0,395
TF-4-02	7,52	5,87	8,38	0,868	TF-4-02	8,27	7,81	8,6	0,322
TF-4-03	7,38	6,73	7,82	0,421	TF-4-03	8,21	8,1	8,33	0,099
TF-4-04	7,21	6,53	7,6	0,404	TF-4-04	8,33	8,22	8,5	0,103
TF-4-05	7,55	7,11	7,99	0,312	TF-4-05	8,22	8,1	8,3	0,095
TF-4-06	7,24	6,77	7,62	0,329	TF-4-06	8,31	8,03	8,72	0,257
TF-4-07	7,75	7,33	8,1	0,263	TF-4-07	8,13	7,9	8,4	0,185
TF-4-08	7,72	7,29	8,05	0,254	TF-4-08	8,25	8,07	8,6	0,213
TF-4-09	7,56	7,35	7,77	0,167	TF-4-09	8,12	8	8,25	0,093
TF-5-01	8,07	7,69	8,29	0,230	TF-5-01	8,32	8,1	8,44	0,130
TF-5-02	7,97	7,64	8,52	0,331	TF-5-02	8,59	8,41	8,7	0,109
TF-5-03	7,87	7,53	8,19	0,213	TF-5-03	8,36	8,3	8,44	0,062
TF-5-04	7,77	7,25	8,21	0,437	TF-5-04	8,29	7,99	8,41	0,174
TF-5-05	7,10	6,82	7,38	0,223	TF-5-05	8,24	8,01	8,5	0,181
TF-5-06	7,01	6,4	7,65	0,426	TF-5-06	7,93	7,66	8,1	0,182
TF-5-07	7,50	6,88	8,17	0,522	TF-5-07	8,09	7,95	8,2	0,119
TF-5-08	7,67	7,25	7,88	0,264	TF-5-08	8,06	7,75	8,5	0,328
TF-5-09	7,89	7,49	8,17	0,261	TF-5-09	7,98	7,66	8,3	0,243
TF-5-10	7,90	7,41	8,26	0,301	TF-5-10	8,00	7,77	8,3	0,234
TF-5-11	7,97	7,55	8,31	0,296	TF-5-11	7,96	7,67	8,2	0,210
TF-5-12	7,92	7,63	8,16	0,176	TF-5-12	7,92	7,64	8,2	0,208
TF-5-13	7,84	7,64	8	0,154	TF-5-13	7,80	7,65	8	0,148
TF-5-14	8,01	7,72	8,19	0,166	TF-5-14	7,76	7,68	7,8	0,049
TF-6-01	7,38	7,02	7,85	0,323	TF-6-01	8,25	7,78	8,56	0,311
TF-6-02	7,39	7,14	7,94	0,315	TF-6-02	8,32	7,82	8,6	0,301
TF-6-03	7,49	7,05	8,3	0,494	TF-6-03	8,22	8,04	8,3	0,107
TF-7-01	7,12	6,51	7,61	0,364	TF-7-01	8,46	8,25	8,72	0,171
TF-7-02	7,50	6,73	8,28	0,645	TF-7-02	8,66	8,48	8,83	0,131
TF-7-03	7,79	7,41	8,34	0,338	TF-7-03	8,36	8,15	8,58	0,164
TF-7-04	7,90	7,47	8,17	0,262	TF-7-04	8,20	7,89	8,5	0,268
TF-7-05	7,62	7,27	7,94	0,257	TF-7-05	7,77	7,6	7,98	0,139
TF-7-06	7,50	7,05	7,71	0,286	TF-7-06	7,71	7,64	7,85	0,081

Fuente: Datos de los informes de seguimiento ambiental del Proyecto.

Análisis sobre la correlación entre mediciones de monitoreo obtenidas a través de métodos en terreno (2006-2011) y métodos en laboratorio (2012-2017), para conductividad eléctrica y pH.

Ricardo Bórquez¹

13/09/2018

Resumen

Este estudio muestra evidencia de correlación entre las mediciones obtenidas en campañas durante 2006-2011 y posteriores a ese período, para el monitoreo de la conductividad eléctrica y pH. A partir de este resultado, se desarrolla un procedimiento de estandarización de las mediciones de monitoreo del período 2006-2011 efectuadas a través de métodos en terreno, con el propósito de homologarlas a las mediciones del período 2012-2017 obtenidas a través de métodos de laboratorio.

1. Introducción

De acuerdo al requerimiento efectuado por la Superintendencia del Medio Ambiente en la Res. Ex. N°21/Rol F-041-2016 de fecha 4 de septiembre de 2018, relativo a complementar el documento “Análisis Metodologías de Monitoreo de Conductividad Eléctrica y pH”, en el presente informe se aborda el análisis de correlación entre las mediciones de monitoreo obtenidas durante el período 2006-2011 y posteriores a ese período para las variables de conductividad eléctrica (CE) y pH.

Para la autoridad ambiental el análisis de correlación tiene por objeto *“poder evaluar los cambios en el pH y salinidad del suelo, utilizando toda la información generada a través del seguimiento ambiental desde el año 2006.”* Aquello también se aborda en este informe, donde se desarrolla un método de estandarización para las mediciones de CE y pH correspondientes al período 2006-2011.

Cabe señalar que el análisis de correlación incluido en el informe elaborado por la especialista en química de suelos, Sra. Adriana Carrasco, presenta evidencia de correlación entre la medición de CE de laboratorio y la diferencia porcentual de mediciones de CE obtenidas a través de los métodos de terreno y laboratorio, que se generaron en campañas realizadas en distintos períodos de tiempo. Los resultados indicaron que las diferencias porcentuales entre ambos métodos son más altas (bajas) en suelos de mayor (menor) salinidad. En consideración de que cada transecto se distribuye en sentido Este-Oeste, se esperaría en general que en los puntos ubicados más al Este la CE sea menor. Así, los resultados de la Sra. Adriana Carrasco nos anticipan que la distribución espacial de las mediciones de CE es un insumo fundamental para entender la correlación de mediciones obtenidas con distintas metodologías y esta última propiedad caracteriza a la respectiva distribución temporal.

En las secciones 2 y 3 de este informe se detallan los distintos argumentos que muestran evidencia de una correlación temporal en las medidas de monitoreo, en CE y pH. Para tales efectos, lo estándar es usar herramientas de análisis de series de tiempo que requieren contar con una cantidad suficiente de observaciones temporales. Sin embargo, tal condición no se verifica en nuestro caso ya que las mediciones de monitoreo tienen una periodicidad anual y abarcan sólo 12 años en total. Entonces, el requerimiento de la Superintendencia de Medio Ambiente plantea un desafío técnico y esto justifica que algunos de los argumentos que se discuten son más bien de una naturaleza teórica. En la sección 4 se detalla el procedimiento para estandarizar las mediciones del período 2006-2011.

¹ Doctor en Estadística. Académico e investigador de la Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal de la Pontificia Universidad Católica de Chile. E-mail: rborqued@uc.cl. Teléfono: 56 2 2354 4184.

2. Análisis de correlación espacio/temporal

Un método validado para generar evidencia empírica acerca de la correlación de datos que están distribuidos en series espaciales o temporales, es el análisis de las funciones de autocorrelación. Estas son representaciones gráficas de las estimaciones de correlación para elementos de la serie que están a una cierta distancia o rezago (Lag) y se reportan a distintos valores de esas distancias. La Figura 1 muestra las funciones de autocorrelación estimadas con promedios de mediciones de CE correspondientes a los períodos de campaña 2006-2011 (Terreno) y de 2012-2017 (Laboratorio).

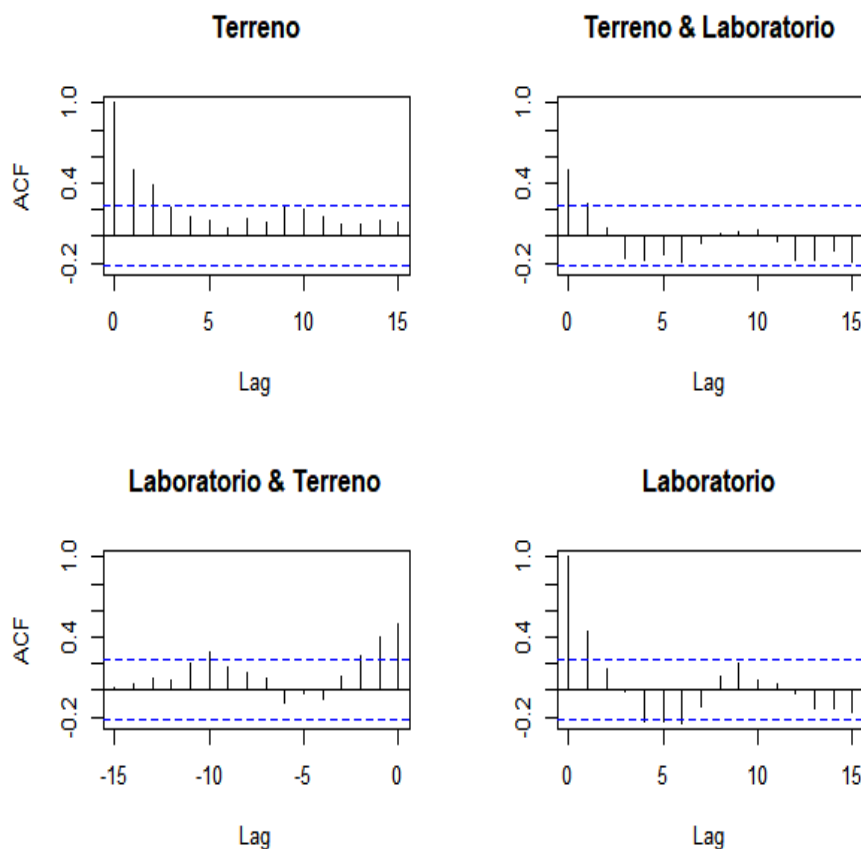


Figura 1: Funciones de Autocovarianza para CE

Las marcas fuera de las bandas segmentadas en los gráficos “Terreno” y “Laboratorio” revelan correlación espacial estadísticamente significativa. Por su parte, los gráficos titulados como “Laboratorio & Terreno” y “Terreno & Laboratorio” esencialmente muestran evidencia de que la correlación espacial sustenta la hipótesis de correlación temporal entre las mediciones de CE obtenidas en los períodos 2006-2011 y 2012-2017.²

Un análisis similar muestra evidencia de correlación temporal significativa en las respectivas mediciones de pH (ver figura en el Anexo A), respondiendo al requerimiento de la Superintendencia del Medio Ambiente en el Considerando 69, de “establecer una correlación entre los resultados obtenidos hasta el año 2011, a través de los métodos de terreno, y los resultados de las mediciones efectuadas en el laboratorio a partir del año 2012.” La sección siguiente aborda este requerimiento de la autoridad ambiental desde un enfoque diferente, presentando evidencia empírica cuya interpretación demanda discutir la teoría de inferencia estadística para modelos de series de tiempo.

²El resultado apoya el análisis de correlación reportado por la Sra. Adriana Carrasco y justifica la validez de su método.

3. Otras propiedades de los datos que apoyan la hipótesis de correlación temporal

El análisis de las funciones de autocovarianza en la sección anterior sugiere que un modelo con especificación estacionaria es adecuado para resumir las características de las series de mediciones de CE y pH en el período 2006 al 2017. La estacionaridad (no debe confundirse con estacionalidad) es una propiedad de la distribución de probabilidades del modelo que genera los datos y como tal, es una teoría que debe ser contrastada. Para modelos de series de distribución espacial o temporal, la propiedad de estacionaridad es la que permite sustentar la validez de las inferencias estadísticas. Por ejemplo, los histogramas de distribución de datos, también llamados distribuciones empíricas, proveen estimaciones válidas acerca de la distribución de probabilidades del modelo que los genera.

La estacionaridad implica que la distribución de probabilidades no cambia en el tiempo o el espacio (aunque si pueden cambiar en las dimensiones temporales y espaciales los momentos condicionales) y por tanto, los elementos de las series estacionarias se pueden representar como transformaciones de otros elementos de esas series. Esto tiene consecuencias prácticas para el análisis de correlación, ya que si se prueba que las series de medición tienen distribución estacionaria entonces no sólo se verifica la hipótesis de correlación temporal de las mediciones de monitoreo, sino que se muestra técnicamente factible el objetivo de la autoridad ambiental de poder evaluar los cambios en CE y pH utilizando toda la información generada a través del seguimiento ambiental desde el año 2006.

Probar estacionaridad en el contexto de nuestro análisis demanda reducir la dimensionalidad del modelo estadístico. La forma más sencilla y transparente de implementar esta restricción es evaluar la estacionaridad de una serie construida como el promedio de estimaciones del período 2006-2017. La distribución de probabilidades del modelo que genera los datos de esta serie tiene componentes temporales y espaciales, si la serie es estacionaria entonces lo es con respecto a ambas dimensiones.

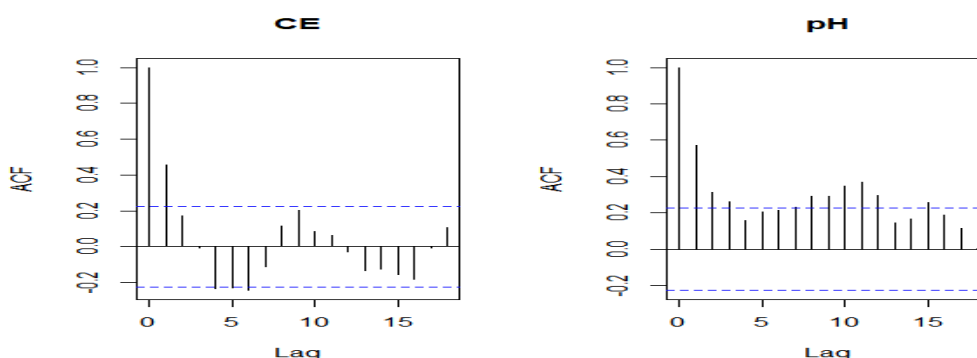


Figura 2: Funciones de Autocovarianza para promedios de mediciones anuales

La primera evidencia de estacionaridad surge de inspeccionar las funciones de autocorrelación, que muestran patrones que se esperaría observar de una serie estacionaria (Figura 2). La segunda evidencia surge de evaluar una implicancia de la estacionaridad, cual es la existencia de una densidad espectral invariante. Para ello utilizamos el test de estacionaridad propuesto por Priestley y Subba Rao, Journal of the Royal Statistic Society Series B 31, p. 140-149. Mediante este test no es posible rechazar la hipótesis nula de que la serie es estacionaria con un valor p de 0,87 para CE y de 0,29 para pH. La tercera y última evidencia es evaluar la existencia de raíces unitarias, que es una especificación de no estacionaridad. El test ADF (Said y Dickey, Biometrika 71, p. 599-607) rechaza la hipótesis nula de una raíz unitaria, con valor p menor que 0,01 para las series CE y pH.

4. Procedimiento de estandarización de mediciones del período 2007-2011

4.1 Marco Teórico

El procedimiento de estandarización que aplicaremos a series de CE y pH, del período 2007-2011, se sustenta en una versión simplificada del método de estimación de modelos estadísticos paramétricos basado en simulación de momentos, Duffie y Singleton, *Econometrica* 61, p. 929-952. Bajo el supuesto de que las observaciones, \mathbf{x} , son generadas por el modelo $\mathbf{x} = f(\mathbf{z}, \mathbf{e})$, donde \mathbf{z} puede contener rezagos de \mathbf{x} y otras covariables y \mathbf{e} es un error de pronóstico, el método resuelve la estimación de la función f con un "matching" o empate de las distribuciones empíricas de las observaciones de \mathbf{x} y de los datos simulados desde el modelo $f(\mathbf{z}, \mathbf{e})$. Este método puede aplicarse a modelos con especificaciones generales, incluso a modelos con especificaciones no estacionarias. En nuestro caso, por la relación existente entre las dimensiones espacial y temporal de las mediciones de monitoreo de CE y pH se tiene que $\mathbf{x} = f(\mathbf{z}(\mathbf{x}), \mathbf{e})$ con alguna elección conveniente de f , donde \mathbf{x} representa a las mediciones obtenidas en el período 2012-2017 y $\mathbf{z}(\mathbf{x})$ a las de 2006-2011. Como los datos provienen de una distribución estacionaria, evaluar $f(\mathbf{z}(\mathbf{x}), \mathbf{e})$ para una cierta función f es esencialmente equivalente a obtener simulaciones del modelo, tal como lo requiere este método.

4.2 Implementación

Denotemos por x_{jt} la medición en el transecto j observada en el tiempo t . Si $t > 2011$ entonces esa observación contribuye a estimar la distribución empírica a empatar. Los demás datos (x_{jt} : $t < 2012$) serán transformados con la siguiente fórmula: $y_{jt} = \exp(a + bx_{jt})$ donde a y b son parámetros a estimar y tales que la distribución empírica de la serie transformada (y_{jt}) esté suficientemente cerca de la distribución empírica de referencia. En la práctica, se especifica un vector de K momentos que resumen a cada distribución empírica y se estima (a, b) tal de minimizar la distancia entre los respectivos vectores. En el reporte de resultados consideramos sólo los momentos media y varianza.

4.3 Resultados

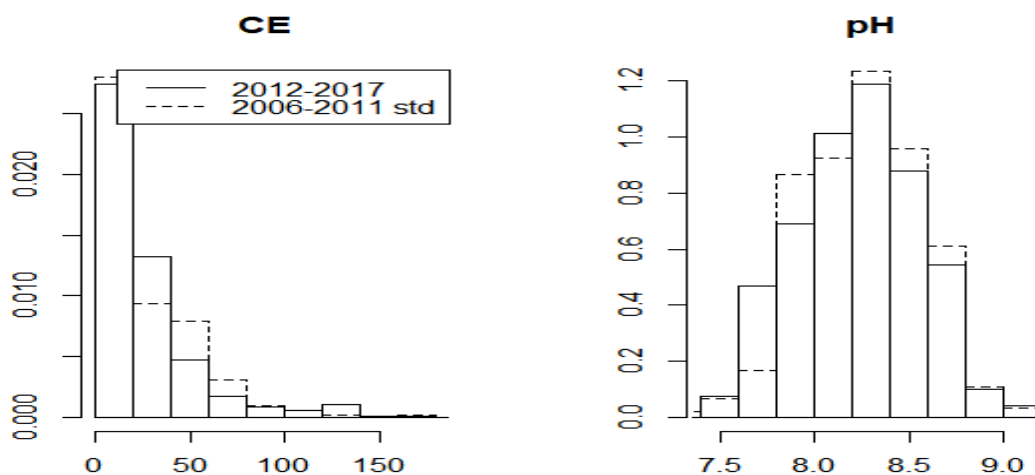


Figura 3: "Matching" de Distribuciones Empíricas de CE y pH

El procedimiento de estandarización permitió re-escalar las mediciones de CE y pH obtenidas en el período 2006-2011 logrando que sus distribuciones empíricas se encuentren cerca de las respectivas distribuciones empíricas de mediciones obtenidas en el período 2012-2017, lo anterior entendido en

el sentido de que los momentos media y varianza de los datos coinciden en cada caso (ver Figura 3). Este “matching” de distribuciones empíricas se obtuvo bajo los valores de los parámetros a y b reportados en la Tabla 1.³ Valores estandarizados de las series CE y pH están en los Anexos C y D.

Tabla 1: Estimaciones de los parámetros a y b (datos del período 2006-2017)

	a	b
CE	-1,494 (0,0184)	1,016 (0,003)
pH	1,490 (0,085)	0,080 (0,011)

Una forma alternativa de apreciar la bondad del ajuste de nuestra estimación se presenta en la Figura 4, que muestra la serie completa de datos de CE; a la izquierda de la línea punteada los datos estandarizados correspondiente al período 2006-2011, a la derecha aquellos del período 2012-2017. (La gráfica análoga que corresponde a las mediciones de pH se reporta en la figura del Anexo B.)

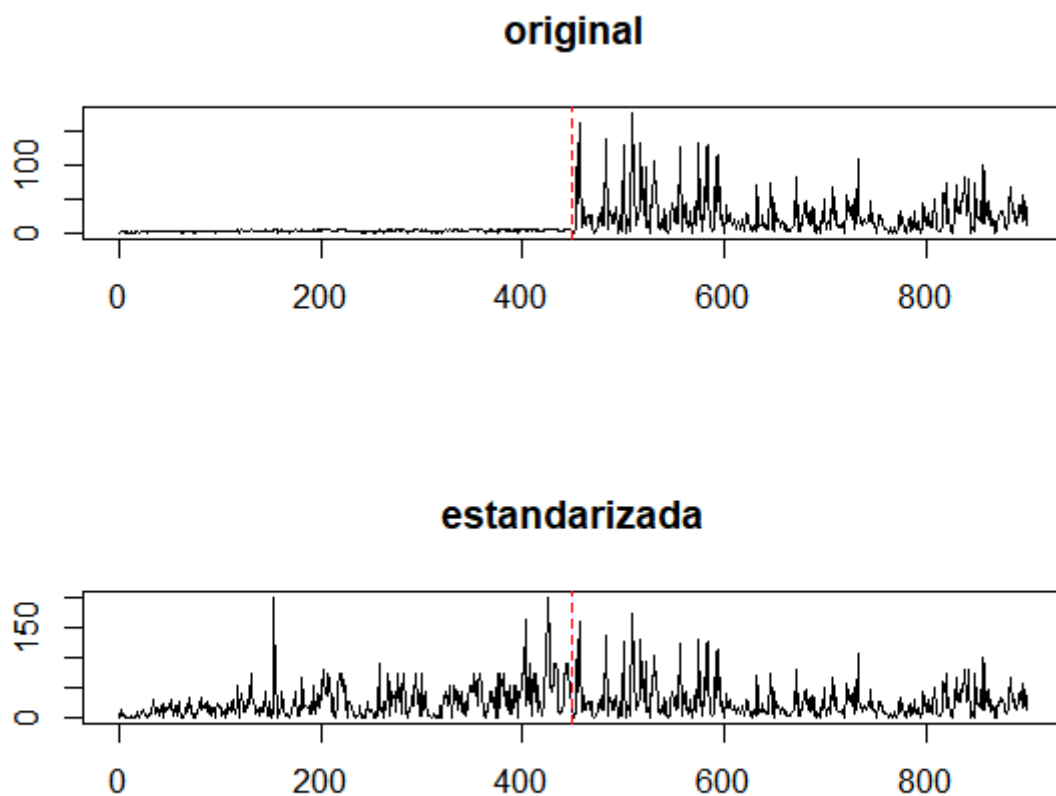
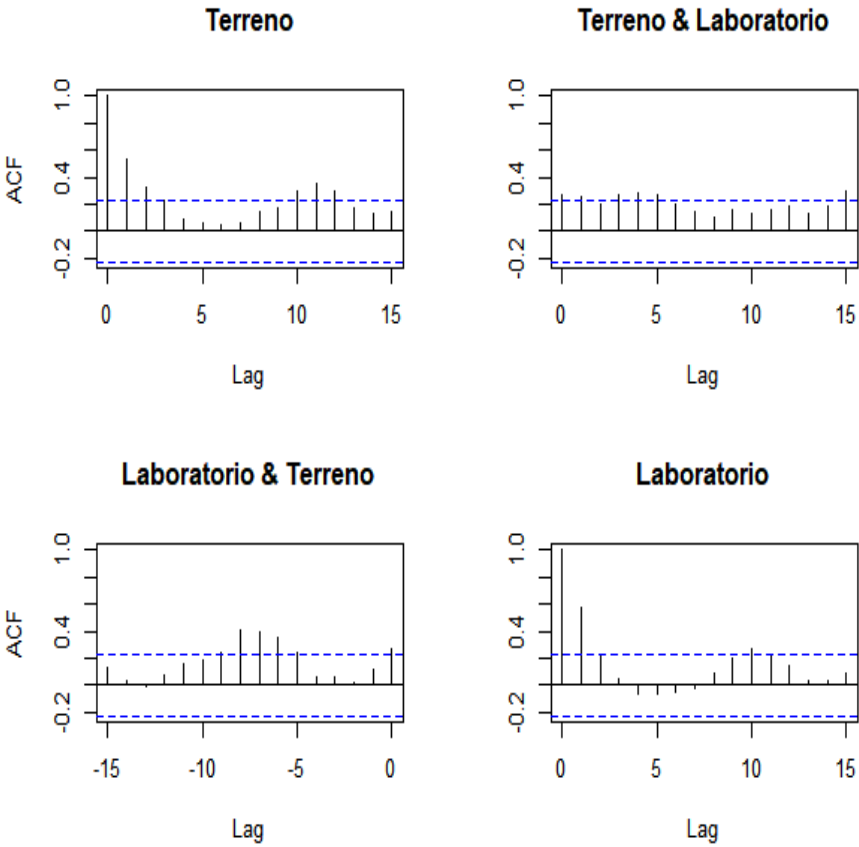


Figura 4: Serie completa de mediciones de CE para el período 2006-2017

³Los números en paréntesis en la Tabla 1 corresponden a las desviaciones estándar de las estimaciones de a y b.

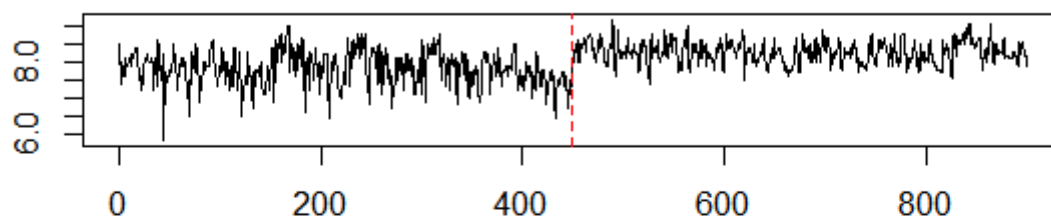
ANEXO A



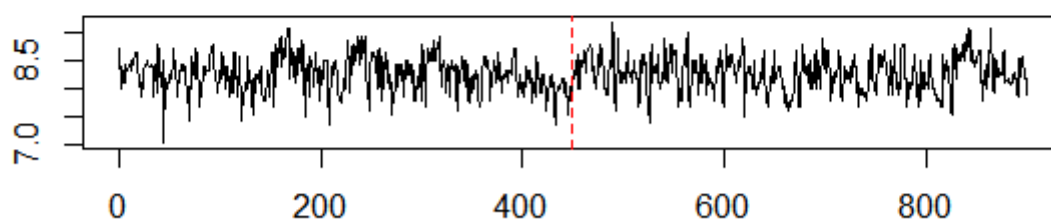
Funciones de Autocovarianza para pH

ANEXO B

original



estandarizada



Serie completa de mediciones de pH para el período 2006-2017

ANEXO C: CE estandarizado

	2006	2007	2008	2009	2010	2011
TF-1-01	0,35	0,56	1,90	1,90	2,32	0,51
TF-1-02	14,91	11,80	14,46	26,61	19,62	26,61
TF-1-03	5,24	7,10	7,86	26,61	32,60	73,49
TF-1-04	6,29	21,71	203,00	26,61	44,22	54,18
TF-1-05	3,03	21,71	48,95	19,62	26,61	54,18
TF-1-06	3,18	32,60	44,22	19,62	7,10	73,49
TF-1-07	0,84	14,46	36,09	3,86	3,15	54,18
TF-1-08	1,01	19,62	1,14	5,24	5,24	19,62
TF-1-09	1,93	17,72	5,80	3,86	5,24	44,22
TF-1-10	0,96	17,72	7,10	1,90	1,90	14,46
TF-1-11	1,12	19,62	21,71	2,32	1,14	44,22
TF-1-12	3,82	26,61	44,22	3,86	2,32	8,70
TF-1-13	0,65	11,80	19,62	7,10	8,70	54,18
TF-1-14	0,74	19,62	14,46	19,62	5,24	11,80
TF-1-15	1,24	11,80	2,32	0,62	0,62	8,70
TF-1-16	0,32	5,40	2,57	3,86	0,84	19,62
TF-1-17	2,21	17,72	7,10	3,15	5,24	54,18
TF-1-18	9,16	13,07	4,73	1,40	1,90	26,61
TF-1-19	3,82	16,01	3,49	1,90	21,71	54,18
TF-2-01	0,52	0,74	0,69	0,62	0,84	0,84
TF-2-02	0,46	10,66	11,80	26,61	14,46	44,22
TF-2-03	12,05	24,04	7,10	14,46	26,61	44,22
TF-2-04	10,14	24,04	29,45	11,80	32,60	32,60
TF-2-05	10,66	19,62	21,71	14,46	44,22	54,18
TF-2-06	14,46	16,01	44,22	11,80	44,22	73,49
TF-2-07	6,42	16,01	36,09	14,46	19,62	73,49
TF-2-08	3,12	2,32	2,32	2,32	54,18	73,49
TF-2-09	2,73	11,80	17,72	1,14	44,22	165,67
TF-2-10	0,98	11,80	4,27	1,14	1,90	19,62
TF-2-11	8,19	2,10	21,71	11,80	7,10	32,60
TF-2-12	4,23	3,86	13,07	5,24	32,60	44,22
TF-2-13	12,29	24,04	66,39	14,46	54,18	90,05
TF-2-14	7,55	8,70	29,45	90,05	44,22	44,22
TF-3-01	29,45	13,07	17,72	14,46	44,22	5,24
TF-3-02	21,50	16,01	21,71	14,46	14,46	54,18
TF-3-03	16,01	11,80	21,71	11,80	44,22	73,49
TF-3-04	7,78	26,61	17,72	26,61	32,60	44,22
TF-3-05	18,09	29,45	19,62	1,14	32,60	73,49
TF-3-06	10,45	16,01	5,80	19,62	11,80	26,61
TF-3-07	12,55	7,10	26,61	19,62	44,22	54,18
TF-3-08	5,51	10,66	6,42	32,60	8,70	11,80
TF-3-09	17,19	21,71	13,07	73,49	11,80	19,62
TF-3-10	21,50	54,18	54,18	54,18	26,61	26,61
TF-4-01	2,28	1,03	7,10	3,15	5,24	5,24
TF-4-02	24,28	24,04	21,71	32,60	19,62	8,70
TF-4-03	15,69	39,95	21,71	44,22	26,61	19,62
TF-4-04	9,83	39,95	39,95	32,60	54,18	44,22
TF-4-05	12,55	17,72	17,72	32,60	44,22	90,05
TF-4-06	23,79	11,80	36,09	44,22	44,22	122,14
TF-4-07	16,01	10,66	29,45	11,80	54,18	165,67
TF-4-08	12,93	14,46	48,95	54,18	44,22	203,00
TF-4-09	31,62	29,45	81,35	73,49	73,49	122,14
TF-5-01	2,60	16,01	59,98	32,60	54,18	54,18
TF-5-02	5,62	24,04	44,22	44,22	54,18	44,22
TF-5-03	21,94	32,60	39,95	8,70	19,62	54,18
TF-5-04	11,45	73,49	36,09	44,22	54,18	54,18
TF-5-05	19,82	36,09	73,49	73,49	73,49	90,05
TF-5-06	3,18	26,61	59,98	73,49	73,49	90,05
TF-5-07	27,71	26,61	66,39	19,62	54,18	90,05
TF-5-08	20,43	16,01	16,01	8,70	44,22	73,49
TF-5-09	1,70	8,70	10,66	11,80	11,80	11,80
TF-5-10	3,35	11,80	32,60	1,40	3,86	8,70
TF-5-11	1,08	13,07	7,10	14,46	1,40	8,70
TF-5-12	4,10	2,32	1,90	14,46	11,80	14,46
TF-5-13	5,80	17,72	4,27	19,62	11,80	11,80
TF-5-14	12,93	11,80	19,62	19,62	14,46	26,61
TF-6-01	22,62	10,66	54,18	54,18	32,60	73,49
TF-6-02	10,45	26,61	66,39	19,62	44,22	73,49
TF-6-03	21,94	9,63	73,49	73,49	26,61	90,05
TF-7-01	32,94	44,22	54,18	54,18	44,22	90,05
TF-7-02	9,34	21,71	73,49	44,22	19,62	73,49
TF-7-03	10,14	16,01	59,98	44,22	32,60	54,18
TF-7-04	1,70	2,32	44,22	3,86	1,90	54,18
TF-7-05	6,82	5,24	54,18	8,70	26,61	11,80
TF-7-06	8,36	26,61	26,61	73,49	73,49	19,62

ANEXO D: pH estandarizado

	2006	2007	2008	2009	2010	2011
TF-1-01	8,76	8,76	8,69	8,90	8,83	8,69
TF-1-02	8,02	8,55	8,69	8,69	8,69	8,35
TF-1-03	8,41	8,69	8,69	8,62	8,62	8,35
TF-1-04	8,15	7,71	7,71	7,96	7,71	7,96
TF-1-05	8,35	7,77	8,35	8,55	8,28	8,22
TF-1-06	8,15	7,96	8,83	8,76	8,69	8,28
TF-1-07	8,48	7,96	8,41	8,83	8,76	8,22
TF-1-08	8,35	8,35	8,76	8,48	8,69	8,35
TF-1-09	8,35	8,41	8,69	8,55	8,55	8,35
TF-1-10	8,41	8,28	8,90	8,62	8,55	8,15
TF-1-11	8,48	8,41	8,97	8,97	8,76	8,35
TF-1-12	8,35	8,35	8,41	8,69	8,55	8,35
TF-1-13	8,55	8,35	8,69	8,90	8,90	8,35
TF-1-14	8,48	8,35	8,76	8,48	8,55	8,28
TF-1-15	8,48	8,55	8,62	8,62	8,69	8,48
TF-1-16	8,69	8,76	8,83	8,97	8,83	8,69
TF-1-17	8,69	8,76	9,04	8,69	8,76	8,76
TF-1-18	8,69	8,83	9,12	8,83	8,97	8,76
TF-1-19	8,55	8,55	9,12	8,97	8,62	8,48
TF-2-01	8,08	8,22	8,22	8,28	8,08	7,89
TF-2-02	8,22	8,28	8,69	8,08	8,48	8,15
TF-2-03	7,89	8,02	8,76	8,08	8,48	8,02
TF-2-04	8,15	7,96	8,69	7,64	8,55	8,28
TF-2-05	8,02	8,28	8,35	8,41	8,28	8,08
TF-2-06	8,35	8,35	8,15	8,62	7,96	8,02
TF-2-07	8,41	8,22	8,48	8,69	8,48	7,89
TF-2-08	8,41	8,69	8,76	8,62	7,89	8,15
TF-2-09	8,55	8,62	8,28	8,69	8,35	8,08
TF-2-10	8,48	8,28	8,69	8,62	8,55	8,41
TF-2-11	8,41	8,41	8,62	8,62	8,41	8,35
TF-2-12	8,41	8,02	8,90	8,02	8,35	8,28
TF-2-13	8,41	8,28	8,35	8,69	8,41	8,15
TF-2-14	8,48	8,41	8,83	8,76	8,48	8,35
TF-3-01	8,41	8,15	8,28	8,28	7,96	8,15
TF-3-02	7,89	7,89	7,52	7,83	7,64	7,77
TF-3-03	8,41	8,35	8,35	8,62	8,41	8,08
TF-3-04	8,48	7,96	8,48	8,48	8,22	8,15
TF-3-05	7,96	7,96	7,89	8,02	8,15	7,89
TF-3-06	8,83	8,69	8,62	8,69	8,62	8,62
TF-3-07	8,76	8,69	8,55	8,48	8,48	8,48
TF-3-08	8,41	8,35	8,48	8,55	8,55	8,22
TF-3-09	8,08	8,08	8,35	8,22	8,28	8,22
TF-3-10	8,15	7,89	8,08	8,02	8,08	7,96
TF-4-01	8,55	8,62	8,62	8,28	8,55	7,96
TF-4-02	7,06	8,22	8,69	8,08	8,41	8,28
TF-4-03	8,22	7,96	8,15	7,58	7,83	8,28
TF-4-04	7,89	7,46	8,15	7,96	7,77	8,15
TF-4-05	8,15	7,96	8,41	7,83	8,22	8,08
TF-4-06	8,15	7,83	7,83	8,15	7,96	7,64
TF-4-07	8,28	8,15	8,35	8,48	8,22	7,96
TF-4-08	8,22	8,15	8,22	8,48	8,28	7,96
TF-4-09	8,22	8,02	8,22	8,08	8,02	8,15
TF-5-01	8,55	8,62	8,55	8,48	8,35	8,22
TF-5-02	8,76	8,15	8,55	8,28	8,35	8,28
TF-5-03	8,28	8,35	8,55	8,35	8,28	8,08
TF-5-04	8,55	8,02	8,55	8,48	7,89	8,15
TF-5-05	7,89	7,83	8,02	7,89	7,71	7,64
TF-5-06	7,89	7,58	7,40	8,22	7,77	7,40
TF-5-07	8,35	8,22	7,71	8,55	7,83	7,89
TF-5-08	8,28	7,96	8,35	8,22	8,35	8,02
TF-5-09	8,48	8,28	8,41	8,28	8,55	8,08
TF-5-10	8,35	8,28	8,28	8,55	8,62	8,02
TF-5-11	8,48	8,22	8,48	8,41	8,62	8,08
TF-5-12	8,35	8,35	8,55	8,28	8,41	8,15
TF-5-13	8,35	8,15	8,41	8,28	8,41	8,22
TF-5-14	8,41	8,41	8,35	8,48	8,55	8,22
TF-6-01	7,77	7,96	7,96	7,83	8,22	7,96
TF-6-02	7,96	7,89	7,89	8,35	7,83	8,15
TF-6-03	8,08	7,83	7,83	7,83	8,28	7,89
TF-7-01	7,46	7,96	7,77	7,83	8,15	7,89
TF-7-02	8,55	7,83	7,83	8,22	8,55	7,58
TF-7-03	8,62	8,28	8,15	8,08	8,41	8,02
TF-7-04	8,48	8,35	8,22	8,48	8,41	8,08
TF-7-05	8,35	8,22	8,02	8,28	8,15	7,96
TF-7-06	8,22	7,89	8,22	7,83	8,22	8,22