



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

# CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA DEL SUELO DE LA VIÑA MALVILLA, SAN ANTONIO, REGIÓN DE VALPARAISO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

SEBASTIÁN MATÍAS PLAZA SOLANO

PROFESOR GUÍA:

BRIAN TOWNLEY CALLEJAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

KATJA DECKART

MARCELO FARÍAS THIERS

SANTIAGO DE CHILE  
2018

# Resumen

El presente trabajo de título consistió en la caracterización geoquímica aplicada a suelos de una viña (cultivo de vid cv. Pinot noir) situada en Malvilla, V Región de Valparaíso, Provincia de San Antonio.

En primer lugar, la metodología empleada en este trabajo, se basó en el procesamiento matemático-estadístico de la totalidad de la base de datos, obtenida mediante los análisis químicos de muestras de suelo provenientes en la zona de estudio. Para así, dar con la caracterización y distribución espacial de la línea base, obtenida mediante el cálculo de estadígrafos, y el empleo de histogramas, *box plots* y *raster* de interpolación. Como también, la determinación de la proveniencia de los elementos químicos mediante el empleo del factor de enriquecimiento.

En segundo lugar, la metodología utilizada se basó en la aplicación de herramientas de estadística multivariable, que considera el empleo de herramientas como análisis de correlación múltiple, análisis de componentes principales y análisis factorial.

En tercer lugar y final, la metodología se basó en la evaluación y comparación de aquellos elementos que presenten un riesgo para la calidad y sanidad medio-ambiental de suelos.

Los principales resultados muestran el Ca exhibe diferencias significativas entre la concentración máxima presente en los suelos de la zona de estudio, y los niveles reportados en coquinas pertenecientes a la Secuencia Sedimentaria Malvilla, asociada a la diferencia de nivel entre la zona de plantación y el nivel base local.

La primera asociación del factor 1 [Ti, Mn, Mo, Cu, Zn, Co, Th, Sb, V, La, Cr, W, Zr, Sn, Sc, Hf, Ta, Nb, Ga, In, REE, (Pb), (Ag), (Ni), (As), (U), (Bi) y (Cs)], la primera asociación del factor 2 [Ti, Mn y V, (Fe), (Mo), (Zn), (Co), (Cr), (Sn), (Ta) y (Nb)], y la asociación del factor 4 [Ti, (Ga), (In), (Rb), (Ce), (Th) y (Al)]. Y, por otra parte, la segunda asociación del factor 1 [Na, K, Sr, (Ca) y (Rb)] y la primera asociación del factor 3 [Ca, Mg, Ni, Cr y Sc y (Ga)] se encuentran principalmente asociados a procesos de tipos litogénicos/pedogénicos, relacionados a procesos de meteorización y fraccionamiento del material heredado proveniente de unidades intrusivas y calcáreas, respectivamente.

Con respecto a procesos antropogénicos, la segunda asociación del factor 3 [K, As, Sb, Ba, W, Zr, Hf, Cs, (Pb), (Li) y (Rb) y (Na)] y la asociación geoquímica del factor 6 [P, (K) y (Cu)] se encuentran asociados a la intensa manipulación artificial de predios vitivinícolas.

Elementos correspondientes a As, Co, Cr, Cu, Ni, V y Zn presentan concentraciones sobre el límite de las normas de diversas legislaciones, sin embargo, es necesario la realización de estudios más acabados para dilucidar la real dimensión en lo que respecta su peligro para la calidad medio-ambiental de los suelos estudiados.

"Lo que estamos haciendo a los bosques del mundo, no es sino el reflejo de lo que nos hacemos a nosotros mismos." - Mahatma Gandhi.

# Agradecimientos

Gracias al proyecto Innova 12CTI-16788 por el financiamiento del presente trabajo.

Gracias a mi profesor guía Brian Townley y miembros de la comisión Katja Deckart y Marcelo Farías por su ayuda.

Gracias a mi padre, Juan, que pese a que partió tempranamente de mi vida dejó en mí las bases y cimientos de la persona que actualmente soy. Gracias a mi madre, Sara, por su amor, cuidado y apoyo incondicional durante todos estos años, ambos sabemos que no ha sido fácil, pero siempre salimos adelante.

Gracias a mis hermano/a (Marcelo y Andrea), y a mis respectivos cuñado/a (Claudio y Carolina), por el apoyo y cariño durante todos estos años, ya que independiente de la edad que tenga, me siguen mirando cada uno como un hijo. Gracias a mis sobrinos (Cristóbal, Camila, Diego, Florencia y Martín) por los momentos de risa que me han regalado.

Gracias a Bárbara, por tu apoyo, paciencia y amor durante estos 10 años, gracias por estar siempre ahí y por las numerosas chancherías que nos mandamos durante estos años.

Gracias a todos los amigos que me han acompañado durante toda la vida, por las conversaciones y buenos ratos pasados y por venir.

Gracias a todos y cada uno de ustedes!

# Tabla de contenido

1.1	Presentación y contexto actual .....	1
1.2	Fundamentación del problema .....	1
1.3	Objetivos .....	4
1.3.1	Objetivo General .....	4
1.3.2	Objetivos específicos.....	4
1.4	Hipótesis de trabajo.....	5
1.5	Conceptos Generales .....	5
1.5.1	Sistema edáfico y pedogénesis .....	5
1.5.2	Elementos mayores (macroelementos) y elementos trazas (micro elementos) .....	6
1.5.3	Macro-micro nutrientes, metales y metaloides.....	6
1.5.4	Terroir .....	8
2.	Recopilación de antecedentes.....	9
2.1	Ubicación y vías de acceso.....	9
2.2	Clima .....	10
2.3	Vegetación.....	12
2.4	Marco geomorfológico.....	13
2.5	Marco geológico.....	16
2.5.1	Mapa geológico del área de San Antonio-Melipilla (Gana et al, 1996) .....	16
2.5.2	Estudio geológico, petrográfico y granulométrico del material parental de suelos vitivinícolas de la zona Central de Chile (Contreras (2015)).....	18
2.6	Suelos .....	22
3.	Metodología .....	24
3.1	Recopilación bibliográfica de la zona de estudio .....	24
3.2	Metodología de muestreo y terreno.....	24
3.2.1	Grilla de muestreo .....	24
3.2.2	Selección de muestras .....	25
3.3	Metodología de laboratorio .....	26
3.3.1	Preparación de muestras y procesamiento de datos .....	26
3.3.2	Adquisición y procesamiento de datos .....	26
3.3.3	Control de calidad y validación de datos.....	26
3.3.4	Validación de base de datos .....	28
3.4	Metodología de análisis de resultados.....	29

3.4.1	Línea base.....	29
3.4.2	Estadística univariable.....	29
3.4.3	Estadística multivariable .....	33
3.5	Comparación con normas internacionales.....	35
3.5.1	Normativa Alemana .....	35
3.5.2	Normativa Estado de Sao Paulo (Brasil).....	36
3.5.3	Normativa Canadiense .....	36
3.5.4	Normativa Holandesa.....	37
4.	Resultados .....	39
4.1	Estadística univariable.....	39
4.1.1	Elementos mayores .....	39
4.1.2	Elementos trazas.....	40
4.1.3	Factor de enriquecimiento .....	43
4.4	Estadística multivariable .....	44
4.4.1	Análisis de correlación múltiple.....	44
4.4.2	Análisis multivariable .....	44
5	Discusiones .....	52
5.1	Estadística univariable.....	52
5.1.2	Concentraciones elementales y distribución espacial.....	52
5.1.3	Factor de enriquecimiento .....	65
5.2	Asociaciones geoquímicas .....	66
5.3	Comparación con estudios y normas internacionales.....	76
6	Conclusiones .....	81
7	Bibliografía .....	85
	ANEXOS.....	92

# Índice de figuras

Figura 1-1 Evolución de la producción total (hl) de vinos, años 1997-2016 .....	2
Figura 1-2 Clasificación de las áreas de producción de vinos de Chile, según su ubicación geográfica. ....	3
Figura 1-3 Curva producción versus concentración para microelementos esenciales y no esenciales.....	7
Figura 2-1 Ubicación de la zona de Malvilla .....	9
Figura 2-2 Ubicación de la zona de estudio .....	10
Figura 2-3 Ubicación de la estación meteorológica de Cerrillos de Leyda.....	11
Figura 2-4 Precipitación promedio anual de Cerrillos de Leyda, periodo 1940-2015.....	12
Figura 2-5 Ensanchamiento hacia la línea de costa del Estero el Sauce, zona de San Antonio. ....	14
Figura 2-6 Niveles de terraza marina. ....	15
Figura 2-7 Mapa de pendientes de la zona de Malvilla. ....	15
Figura 2-8 Mapa de la geología de la zona de estudio presentes en Gana et al., (1996). ....	17
Figura 2-9 Mapa de la geología de la zona de estudio presente en Contreras (2015). ....	20
Figura 2-10 Zona destinadas a plantación de vid.....	22
Figura 2-11 Histograma de distribución.....	23
Figura 3-1 Mapa de la zona de estudio y disposición de la grilla de muestreo. ....	25
Figura 3-2 Diagrama Box-Plot teórico. ....	31
Figura 4-1 Factor de enriquecimiento.....	43
Figura 4-2 Resultados Análisis Factorial.....	47
Figura 5-1 Distribución espacial del elemento hierro.....	54
Figura 5-2 Distribución espacial del elemento calcio.....	55
Figura 5-3 Superficie colgada, zona de Malvilla .....	56
Figura 5-4 Distribución espacial del elemento magnesio. ....	57
Figura 5-5 Distribución espacial de la primera asociación geoquímica del factor 1 .....	68
Figura 5-6 Distribución espacial de la segunda asociación geoquímica del factor 1. ....	69
Figura 5-7 Distribución espacial del elemento sodio. ....	69
Figura 5-8 Distribución espacial de la primera asociación geoquímica del factor 2.....	70
Figura 5-9 Distribución espacial de la segunda geoquímica del factor 2. ....	71
Figura 5-10 Distribución espacial de la primera asociación geoquímica del factor 3. ....	72
Figura 5-11 Distribución espacial de la segunda asociación geoquímica del factor 3. ....	73
Figura 5-12 Distribución espacial del elemento antimonio. ....	74
Figura 5-13 Distribución espacial del elemento arsénico. ....	75
Figura 5-14 Distribución espacial de la asociación geoquímica del factor 4.....	75
Figura 5-15 Distribución espacial de la asociación geoquímica del factor 6.....	76
Figura 5-16 Relación entre proporción mineral y biodisponibilidad.....	77

# Índice de ecuaciones

Ecuación 1-1 Factores de estados del suelo.....	5
Ecuación 3-1 Error analítico .....	27
Ecuación 3-2 Coeficiente de variación de duplicados .....	27
Ecuación 3-3 Coeficiente de variación muestras estándares.....	28
Ecuación 3-4 Factor de enriquecimiento .....	32
Ecuación 3-5 Coeficiente de correlación de Pearson.....	33

# Índice de Tablas

Tabla 1-1 Principales factores de formación de suelo y ecosistemas. ....	5
Tabla 2-1 Promedio precipitación anual de Cerrillos de Leyda, periodo 2000-2015.....	11
Tabla 3-1 Elementos mayores y trazas.....	26
Tabla 3-2 Elementos bajo el límite de detección .....	27
Tabla 3-3 Elementos descartados en el presente estudio. ....	28
Tabla 3-4 Elementos validados en el presente estudio.....	29
Tabla 3-5 Criterio de análisis para factor de enriquecimiento. ....	33
Tabla 3-6 Criterios establecidos por le República Federal de Alemania para la calidad de suelos.....	36
Tabla 3-7 Criterios establecidos para la calidad de suelos, Estado de Sao Paulo, Brasil. ....	37
Tabla 3-8 Criterios establecidos para la calidad de suelos según la normativa canadiense.....	37
Tabla 3-9 Criterios establecidos para la calidad de suelos según la normativa holandesa. ....	38
Tabla 4-1 Resumen estadístico de concentraciones elementales de elementos mayores. ....	39
Tabla 4-2 Resumen estadístico de concentraciones elementales de elementos trazas.....	41
Tabla 4-3 Categorización de elementos según fuente de origen.....	43
Tabla 4-4 Análisis de correlación múltiple.....	45
Tabla 4-5 Resumen análisis de componentes principales.....	46
Tabla 4-6 Correlación entre variables geoquímicas y factores asociados .....	48
Tabla 5-1 Macronutrientes, micronutrientes y elementos tóxicos. ....	52
Tabla 5-2 Factor de carga (>0,75) para elementos del factor 1. ....	67
Tabla 5-3 Concentración promedio para Fe, Ti, Mn, Mo, Zn, Co, V, Sn, Ta y Nb en rocas ígneas y sedimentarias.....	67
Tabla 5-4 Resumen normativas internacionales establecidas para calidad de suelos.. ....	78

# 1. Introducción

## 1.1 Presentación y contexto actual

La calidad del vino chileno sin duda es reconocida dentro de la industria vitivinícola mundial. Dicha calidad se basa en una variedad de factores, principalmente asociada a su geografía, clima y a los procesos relacionados a la viticultura y vinificación. Estos dos últimos han experimentado un gran y continuo desarrollo durante las últimas décadas.

El aislamiento geográfico del territorio debido a la presencia del océano Pacífico por su borde occidental, a la cordillera de Los Andes por su borde oriental, por el desierto de Atacama por el norte, y finalmente por los hielos australes de la Patagonia por el sur, junto con la influencia de la corriente marina de Humboldt producen un benigno clima mediterráneo, de estaciones bien marcadas, con amplios diferenciales de temperatura entre el día y la noche, lo que ha permitido la preservación de la sanidad de sus suelos, además de la ausencia de plagas y enfermedades, principalmente de la filoxera, uno de las principales limitantes para la propagación de la implantación de la *vitis vinífera* en otras localidades del continente Sudamericano (Nahrwold, 2014).

La evolución de la producción de vinos en Chile evidencia un claro aumento a partir del año 1997, año en el cual la producción de vinos no superaba los 5.000.000 hl, en el año 2016 la producción anual de vinos alcanzó los 1.014.362.034 l (Figura 1-1), de los cuales 852.483.830 l corresponden a vinos con denominación de origen, equivalente al 84,0% del total declarado; 121.774.750 l a vinos sin denominación de origen; y 40.103.454 l a vinos de uva de mesa (SAG, 2016).

Debido a lo expuesto con anterioridad, es que las condiciones actuales de la industria vitivinícola chilena y mundial exigen una variedad de estudios que lleven a comprender el proceso de desarrollo de la *vitis vinífera*, en particular, la influencia de las propiedades físicas y químicas, además de las condiciones geomorfológicas de la infinidad de suelos destinados a la plantación a lo largo de todo el territorio.

## 1.2 Fundamentación del problema

La presente memoria de título se encuentra enfocada en el estudio geoquímico aplicado a suelos de una viña (cultivo de variedad Pinot noir) situada en Malvilla, V Región de Valparaíso, Provincia de San Antonio. La zona se encuentra ubicada en áreas costeras de producción de vinos, según la clasificación dada por Wines of Chile, New Classification of Chile's Wine-Producing Areas, como se despliega en la Figura 1-2. El presente trabajo concierne la caracterización geoquímica del sistema suelo-sustrato en suelos destinados a plantación de vid y sus alrededores.

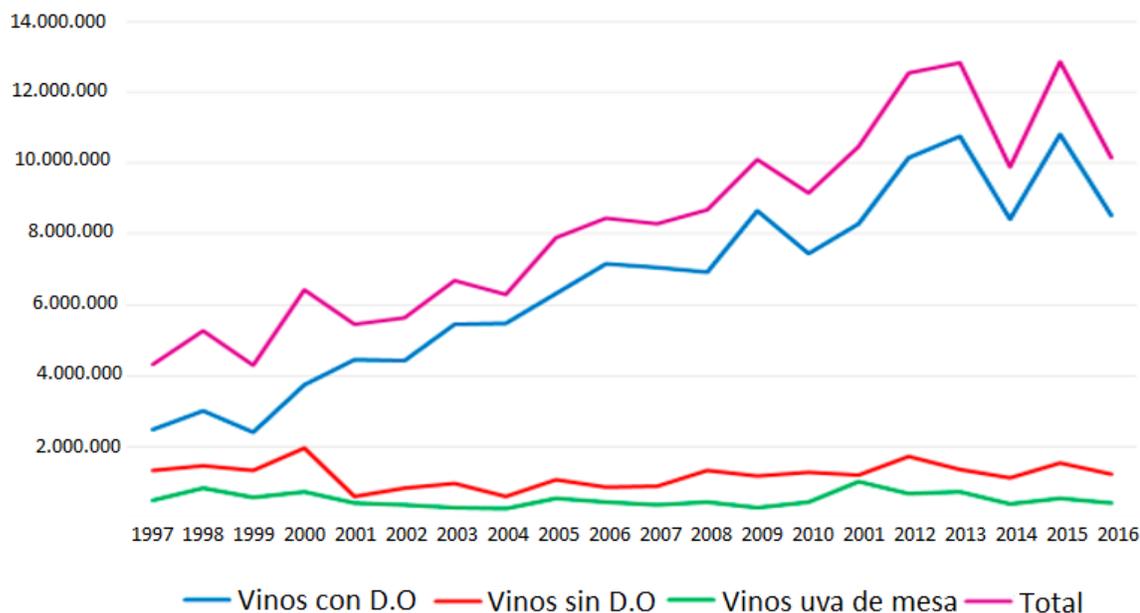


Figura 1-1 Evolución de la producción total (hl) de vinos, años 1997-2016 (SAG, 2016).

La relación entre geología y viticultura es sin lugar a duda, una nueva área de estudio que ha despertado un mayor interés en la medida que desde la industria vitivinícola ha aumentado el interés por comprender la influencia de la geología en el desarrollo de la vid. Desde la perspectiva de las ciencias agronómicas diversos estudios se han llevado a cabo, principalmente enfocados a aspectos climáticos y en las propiedades del suelo (Vadour y Shaw, 2005).

Es indispensable, hacer notar la importancia de tener un conocimiento más profundo sobre la concentración de aquellos elementos químicos fundamentales para el crecimiento de la vid (elementos mayores y elementos trazas), además de aquellos que presentes en una concentración anómala representen un peligro para el correcto crecimiento y desarrollo de la plantas Este conocimiento es sin duda, necesario para prevenir cualquier problema asociados a las temáticas presentadas con anterioridad, considerando el corto, mediano y largo plazo.

Llevar a cabo esta caracterización sin lugar a dudas representa un gran desafío, ya que estudios geoquímicos y mineralógicos aplicados a suelos destinados a plantación de vid son escasos (Poblete et al, 2007), no obstante, existen una diversidad de estudios en otros lugares del mundo (principalmente Europa, Norte América y Oceanía) que pueden ser tomados como referencia para guiar el presente trabajo. El desarrollo de un número mayor de estudios de esta índole podría resultar de inmensa utilidad para la investigación, desarrollo, innovación de la industria vitivinícola chilena.

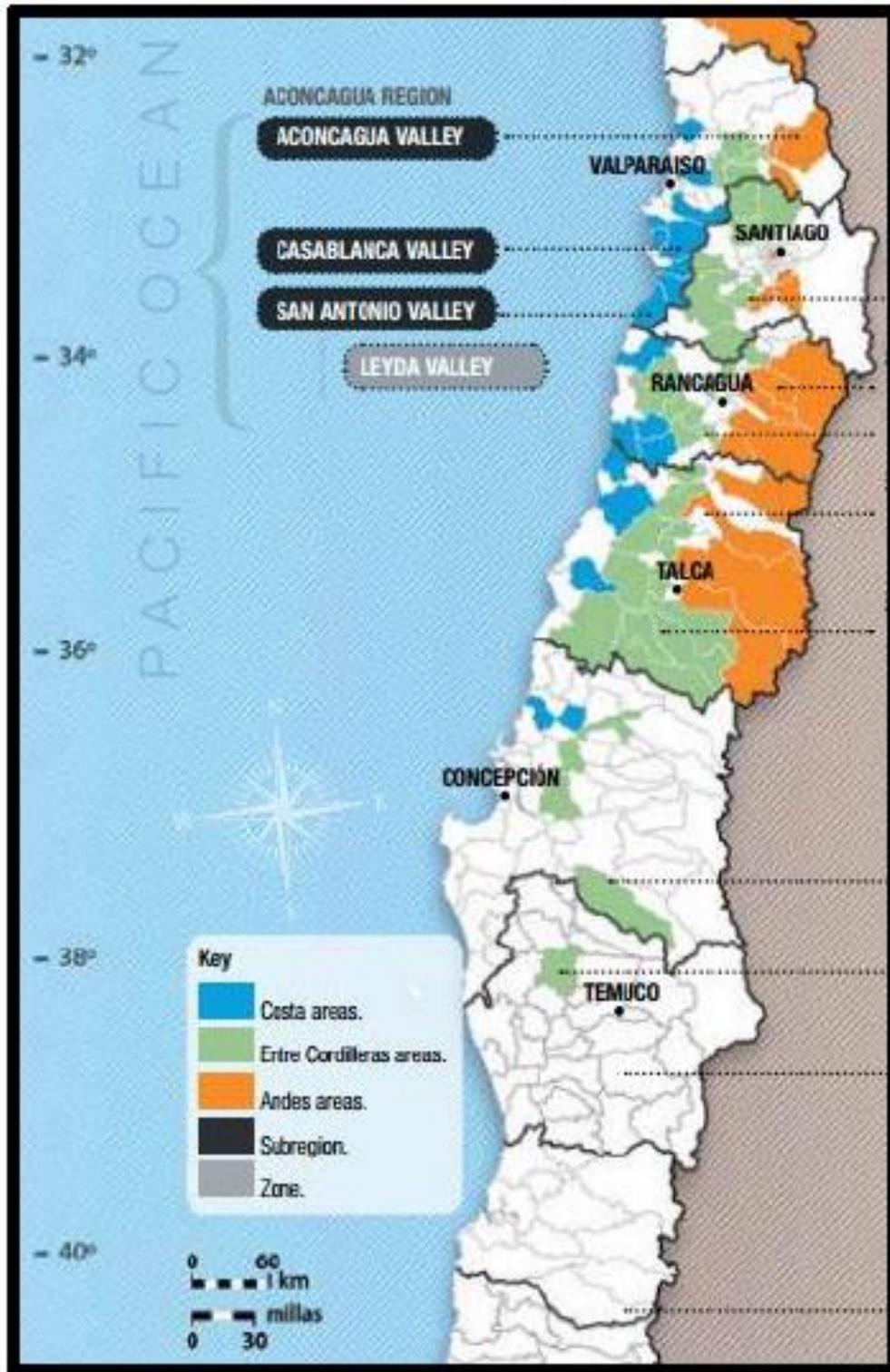


Figura 1-2 Clasificación de las áreas de producción de vinos de Chile, según su ubicación geográfica. La zona de estudio corresponde al área costera del valle de San Antonio (imagen modificada de Revista Wines of Chile, New Classification of Chile's Wine-Producing Areas).

Las observaciones y resultados obtenidos a partir de este estudio forman parte de la primera fase del Proyecto Corfo Innova 12CTI-16788, denominado “Influencias geológicas, mineralógicas y geoquímicas del cultivo de la vid en Chile”, desarrollado por el Departamento de Geología de la Universidad de Chile, financiado por Corfo y el Consorcio I+D de Vinos de Chile; y llevado a cabo por Pamela Castillo y Brian Townley.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo General

El presente trabajo tiene como objetivo principal, el caracterizar por medio de la geoquímica los suelos empleados para el cultivo de vid en la Cordillera de la Costa, en el área de Malvilla, V Región de Valparaíso.

### 1.3.2 Objetivos específicos

Con respecto a las labores secundarias a realizar, y para lograr el cumplimiento del objetivo principal señalado con anterioridad, se destacan las siguientes:

- Generar una línea base de la química inorgánica de los suelos agrícolas destinados a plantaciones de vid y del resto de la zona de estudio, representada en una serie de mapas geoquímicos tendientes a visualizar la distribución espacial de los elementos de interés.
- Analizar la distribución de los elementos y detectar potenciales anomalías geoquímicas de los elementos analizados en la zona de estudio.
- Determinar la proveniencia de los elementos geoquímicos en el área de estudio, identificando los procesos naturales y antropogénicos involucrados en el proceso de enriquecimiento.
- Evaluar el uso de la geoquímica multielemento a modo de identificador, discriminador de tipo de litología, mineralogía, y origen geológico de suelos y sustratos en predios agrícolas destinados a cultivo de vid.

## 1.4 Hipótesis de trabajo

La química del sistema suelo-sustrato es el resultado de los factores formadores de suelo y la intensidad de acción de cada uno de ellos interrelacionados sobre el material parental. Dado esto, se afirma que la geología de la zona influirá directamente en la geoquímica del suelo, y, por lo tanto, en la fertilidad de este.

## 1.5 Conceptos Generales

### 1.5.1 Sistema edáfico y pedogénesis

El suelo corresponde a un cuerpo natural, diferenciando en horizontes de constituyentes minerales y orgánicos, usualmente inconsolidado, de variable profundidad, que difiere del material parental debido a su distintiva morfología, propiedades físicas y químicas, además de sus componentes. Su origen deriva como producto de la interacción entre la litósfera, la atmósfera, la hidrósfera, y la biósfera. Se compone de tres fases: la fase sólida (mineral y orgánica), la fase líquida y la fase gaseosa, y exhibe las propiedades resultantes del equilibrio químico y físico entre estas. El sistema suelo-sustrato se define mediante la expresión axiomática (Ecuación 1-1) de los factores de estado de Jenny (1941), quien afirma que el estado de desarrollo de un suelo es el producto de cómo se han conjugado un determinado clima (cl), la litología o material de origen (p), los organismos (o) y el relieve (r) en un tiempo determinado (t) (Tabla 1-1).

$$S = f(cl, p, o, r, t, \dots)$$

*Ecuación 1-1 Factores de estados del suelo.*

*Tabla 1-1 Principales factores de formación de suelo y ecosistemas (Jenny, 1941).*

Factor de estado	Definición y características
Clima	Condición atmosférica regional, comúnmente caracterizada por la temperatura y la precipitación media anual.
Material parental	Características químicas y físicas del sistema al tiempo t=0.
Organismos	Flujo potencial de componentes bióticos en el sistema.
Relieve	Gradiente, aspecto y configuración del paisaje al tiempo t=0.
Tiempo	Tiempo transcurrido desde que el sistema se formó o rejuveneció.
Hombre	Factor biótico de magnitud debido a la posición de prácticas y actitudes que alteran el paisaje.

## 1.5.2 Elementos mayores (macroelementos) y elementos trazas (microelementos)

Es de vital importancia, antes que todo, diferenciar el significado acuñado para los términos elementos mayores y elementos trazas utilizado en geoquímica y ciencias biológicas.

Para la geoquímica, los elementos mayores presentan una concentración que predomina en cualquier tipo de roca presente en la Tierra, entre los que se encuentran el silicio (Si), titanio (Ti), aluminio (Al), hierro (Fe), manganeso (Mn), magnesio (Mg), calcio (Ca), potasio (K) y fósforo (P) y sus concentraciones se expresan como tanto por ciento (%) en peso de óxido correspondiente. Los elementos trazas por su parte, presentan una concentración inferior al 0,1%, expresándose en partes por millón (ppm), o incluso, en partes por billón (ppb).

Para la biología y ciencias afín, los elementos mayores (macroelementos) corresponden a aquellos que presentan una concentración mayor a 1000 mg/kg, entre los que se encuentran el carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O) y nitrógeno (N), los cuales conforman los elementos orgánicos principales para plantas y animales, por lo tanto, presentan las mayores concentraciones. El potasio (K) y fósforo (P) se encuentran en concentraciones de 1,4-5,6%, mientras que el calcio (Ca), magnesio (Mg), sodio (Na) y cloro (Cl) presentan concentraciones de 0,1-2,5%. (Wild and Jones, 1988; Marschner, 1995). Por su parte, los elementos trazas (microelementos) para las ciencias biológicas se utiliza para los elementos cuyas concentraciones usualmente son menores a 1000 mg/kg.

En lo que respecta al origen o proveniencia de elementos mayores o trazas, se reconocen 3 fuentes principales: (1) Litogénicas, correspondiente a aquellos elementos que son directamente heredados desde la litosfera (material madre); (2) Pedogénicas, para aquellos elementos que presentan un origen litogénico, pero su concentración y distribución han sido modificada debido a procesos pedogénicos; y finalmente, (3) Antropogénicas, elementos que han sido depositados en los suelos directamente o indirectamente debido al resultado de actividades humanas (Alloway, 2008).

## 1.5.3 Macro-micro nutrientes, metales y metaloides

### 1.5.3.1 Macronutrientes y micronutrientes

Los macronutrientes y micronutrientes corresponden a aquellos elementos que son indispensables para el correcto desarrollo de las plantas.

Según Alloway (2008), ocho son los elementos que son esenciales para el crecimiento de las plantas: boro (B), cloro (Cl), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn), molibdeno (Mo), níquel (Ni) y zinc (Zn). Para Welch y Graham (2005) los microelementos esenciales para el crecimiento de las plantas son: hierro (Fe), manganeso (Mn), boro (B), cobre (Cu), cobalto (Co), molibdeno

(Mo), níquel (Ni), zinc (Zn) y cloro (Cl). Finalmente, para Barker y Pilbeam (2007) otros microelementos que son beneficios, pero que no han podido probarse que sean esenciales corresponden al: silicio (Si), sodio (Na), selenio (Se), vanadio (V) y aluminio (Al).

Para que un elemento sea considerado como esencial, es necesario que cumpla tres criterios: (1) el organismo no puede crecer ni reproducirse normalmente sin la presencia de dicho elemento; (2) su acción debe ser específica y no puede ser reemplazada por otro elemento; y (3) su acción debe ser directa (Arnon y Stout, 1939). Sin embargo, Epstein (1965) propone que un elemento puede ser nombrado como “esencial” si es componente de una molécula que corresponda a un metabolito esencial, incluso en el caso que no pueda demostrarse que cumpla los tres criterios propuestos por Arnon y Stout (1939).

Larcher y Nicolini (2008) muestran que, en la uva, los siguientes micronutrientes se encuentran en concentraciones superiores a 1 ppm: fósforo (P), potasio (K), magnesio (Mg), zinc (Zn), hierro (Fe), manganeso (Mn), molibdeno (Mo), níquel (Ni) y zinc (Zn).

Es importante destacar, que, si el suplemento de cualquiera de los elementos esenciales y no esenciales es inadecuado, tanto la producción como la calidad del cultivo se verán disminuidos. Hay que tener en cuenta que, como muestra la Figura 1-3, tanto deficiencias, como excesivas concentraciones (toxicidad) del mismo elemento son perjudiciales para el correcto desarrollo de la planta.

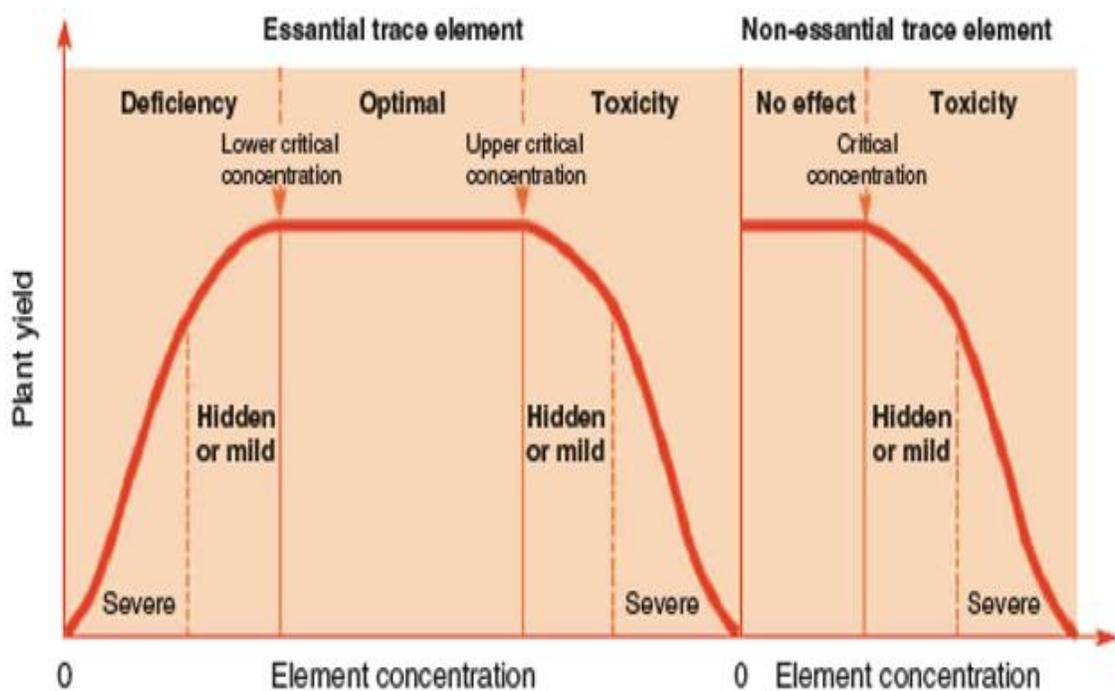


Figura 1-3 Curva producción versus concentración para microelementos esenciales y no esenciales. Alloway (2008).

### 1.5.3.2 Metales y metaloides

De la totalidad de elementos que conforman el suelo, se encuentra un grupo que representan un potencial riesgo para la salud y calidad del medio ambiente. Según Kabata-Pendías (2001), los elementos que presentan un mayor peligro corresponden a: plata (Ag), berilio (Be), oro (Au), cadmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), mercurio (Hg), manganeso (Mn), níquel (Ni), plomo (Pb), selenio (Se), antimonio (Sb), estaño (Sn), telurio (Te), vanadio (V), wolframio (W) y zinc (Zn). Alloway (2008), afirma que los elementos que presentan un mayor peligro para el medio ambiente corresponde a: arsénico (As), berilio (Be), cadmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), mercurio (Hg), níquel (Ni), plomo (Pb), selenio (Se), talio (Tl), vanadio (V), zinc (Zn), además de ciertos elementos del grupo de los lantánidos y actínidos.

### 1.5.4 Terroir

El rendimiento y calidad de la cosecha final de vid se encuentra relacionado con el *terroir*, el cual se define como las múltiples interacciones entre parámetros naturales y antropogénicos, entre los parámetros naturales se destaca el clima y las características físico-químicas del suelo (Vaudour, 2002).

En lo que respecta a las características físico-químicas del suelo, en particular, a las propiedades físicas de este, podemos mencionar la textura, permeabilidad y color del suelo, como también la geomorfología, que involucra conceptos como la pendiente y el aspecto. Las propiedades químicas por su parte, se encuentra influenciada en gran medida por la geología de la roca madre (Hugget, 2005).

## 2. Recopilación de antecedentes

### 2.1 Ubicación y vías de acceso

La zona de estudio se encuentra ubicada en la V Región de Valparaíso, Chile. Específicamente en el sector de Malvilla, Comuna de San Antonio, en la respectiva Provincia de San Antonio (Figuras 2-1 y 2-2).

Para acceder a Malvilla desde Santiago, se debe tomar la ruta 78 en dirección a San Antonio, hasta llegar al sector paso Sepultura, separado a una distancia de 100 kilómetros aproximadamente, posteriormente se debe tomar el camino hacia el sur recorriendo aproximadamente 2,5 km por la ruta G974.

Para acceder a los afloramientos es necesario utilizar los caminos de propiedad privada que existe en la viña y poblaciones aledañas a la zona de estudio, los que se encuentran en buen estado. Debido a lo anterior, es necesario solicitar previamente los permisos correspondientes para realizar las labores precisadas.

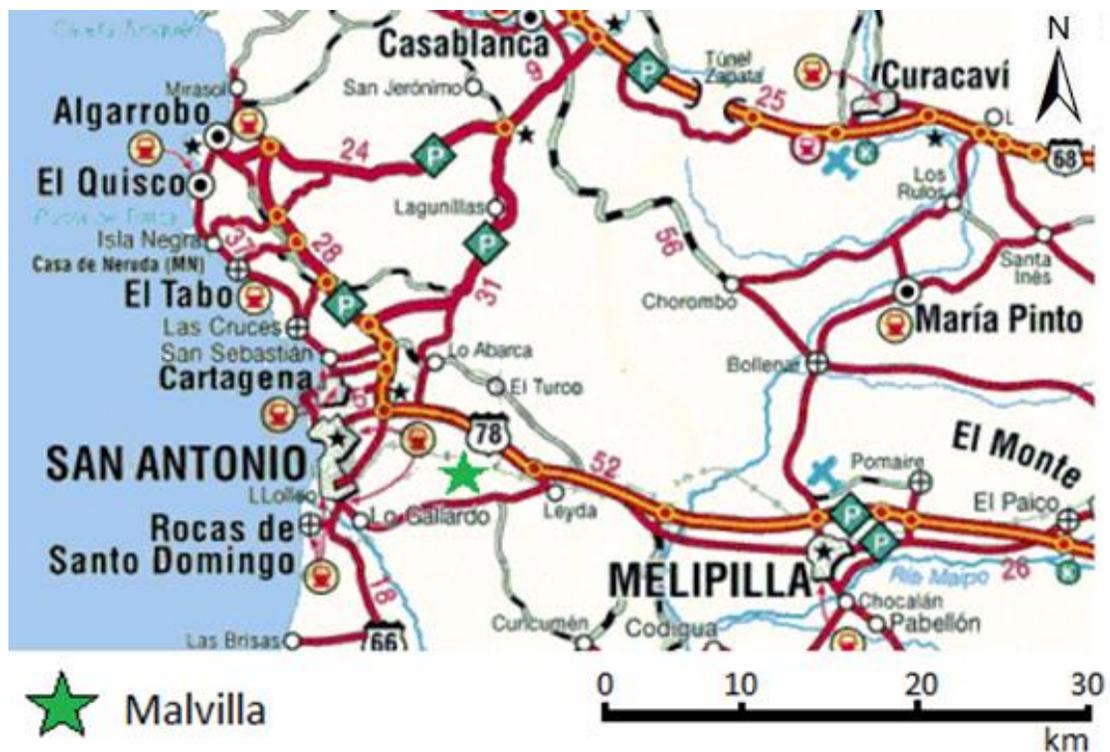


Figura 2-1 Ubicación de la zona de Malvilla. Mapa modificado a partir del Mapa rutero de Chile Turistel ([www.turistel.cl](http://www.turistel.cl)).

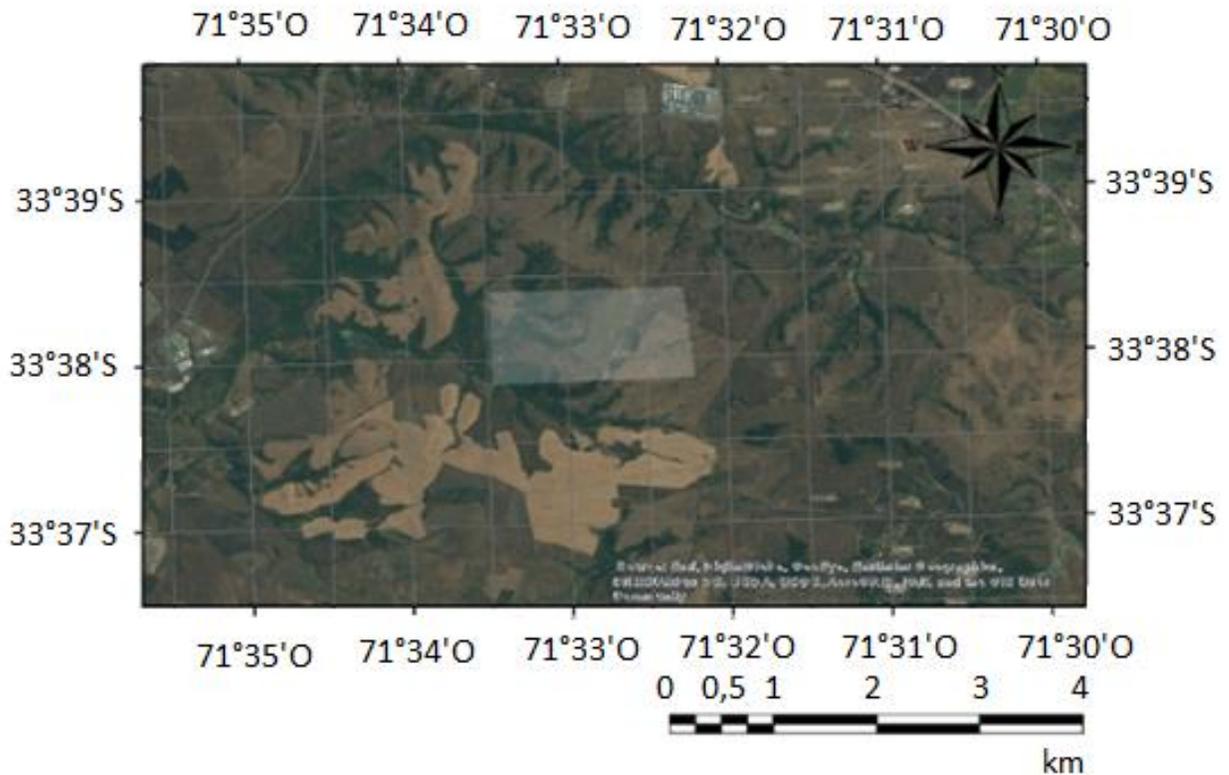


Figura 2-2 Ubicación de la zona de estudio. Imagen modificada desde el software Google Earth Pro.

## 2.2 Clima

El clima de Malvilla corresponde al de tipo mediterráneo con influencia costera, con la presencia de una estación seca de 9 meses de duración. La temperatura promedio anual es de 14,5°C y el promedio de precipitación anual es de 380 mm. Las lluvias se concentran en los meses de mayo a julio (Nahrwold, 2014).

Según Sepúlveda (2003), el sector de Malvilla se encuentra emplazado en el sector cordillera de la costa (CC), presentando una humedad relativa anual de un 77%.

De los datos extraídos de la estación meteorología Cerrillos de Leyda, de coordenadas 33.6344°S-71.5106°O (Figura 2-3), distante a 5,5 km en línea recta del sector de Malvilla, muestran que en el período comprendido entre los años 2000-2015 se produjo una precipitación promedio anual de 430,79 mm (Tabla 2-1 y Figura 2-4).

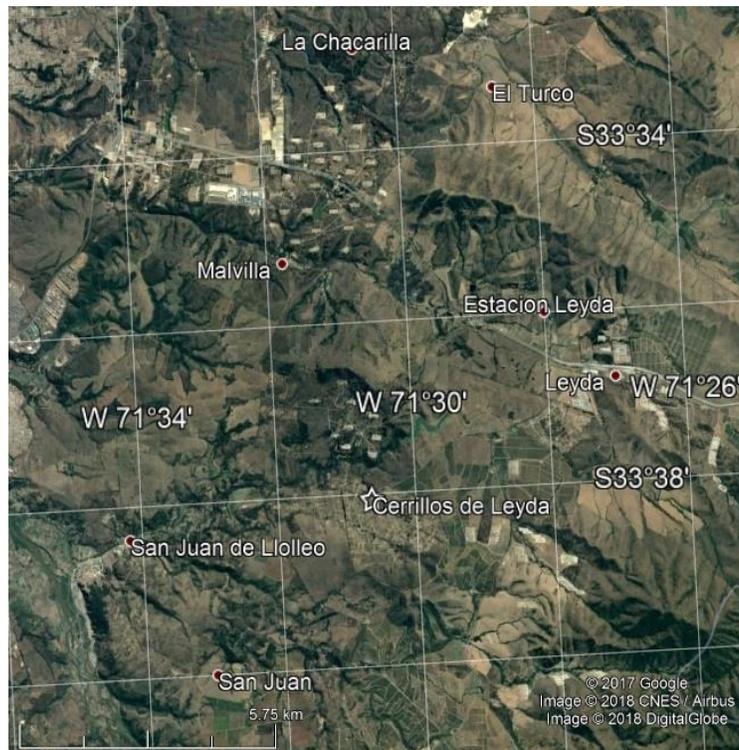


Figura 2-3 Ubicación de la estación meteorológica de Cerrillos de Leyda. Imagen modificada de Google Earth Pro.

Tabla 2-1 Promedio precipitación anual de Cerrillos de Leyda, periodo 2000-2015. Datos proporcionados por la DGA.

Año	Precipitación promedio anual (mm)
2000	515.8
2001	589
2002	738.1
2003	333.2
2004	442.1
2005	590.7
2006	542.6
2007	220.5
2008	526
2009	301.3
2010	353.4
2011	276.3
2012	463
2013	278.5
2014	361.3
2015	360.9
Promedio	430.8

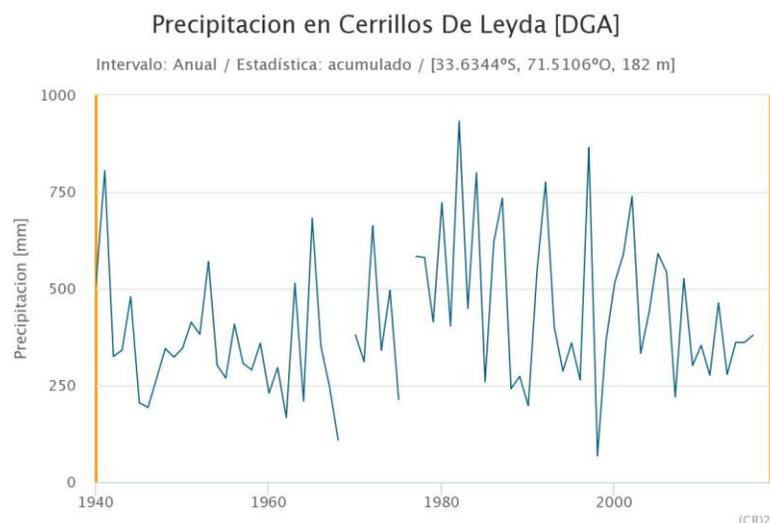


Figura 2-4 Precipitación promedio anual de Cerrillos de Leyda, periodo 1940-2015. Datos proporcionados por la DGA.

De la observación de lo expuesto con anterioridad se desprende una clara disminución de las precipitaciones a partir del año 2007, en particular para el periodo entre 2010-2015 la evidente disminución en la intensidad y su prolongación en el tiempo ha sido denominada como “Megasequía” (Instituto de Asuntos Públicos, 2016; Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2), 2015).

## 2.3 Vegetación

La vegetación nativa de la zona de estudio se encuentra conformada principalmente por matorrales y arbustos, denominado bosque esclerófilo (Venegas et al., 2013). Según Gajardo (1994) es posible encontrar especies como *Persea lingue* (lingue), *Cryptocarya alba* (peumo), *Luma apiculata* (arrayán), *Drimys winteri* (canelo), *Beilschmiedia miersii* (belloto), *Quillaja saponaria* (quillay), *Peumus boldus* (boldo), *Maytenus boaria* (maitén), *Acacia caven* (espino), entre otras.

En las planicies costeras, en lugares sin intervención del ser humano, se puede encontrar colliguay, boldo, quilo, huingán, maitén, quebracho, romerillo, entre las especies arbustivas, además de pegajosas, huillis, maripositas, entre las herbáceas (Hoffmann, 2012).

## 2.4 Marco geomorfológico

La zona de Malvilla se encuentra emplazada en la unidad geomorfológica llamada planicie costera, la cual constituye una franja discontinua en la zona correspondiente a Chile Central (33° a 37° S). Localmente, dichas planicies se identifican como terrazas, las cuales se ubican a cotas desde 4 a 34 m s.n.m. Se caracterizan por ser superficies planas con un relieve poco pronunciado, además, en zonas costeras se caracterizan por presentar playas extensas de arena que alternan con acantilados rocosos. Normalmente estas playas se encuentran en el flanco norte de la desembocadura de grandes ríos, debido a la dirección sur-norte de las corrientes litorales (Borgel, 1983).

En particular, la zona de estudio se encuentra ubicada en una terraza de abrasión marina (Gana et al., 1996). Las terrazas de abrasión marina se forman en las zonas en que la marea fluctúa. En general, son superficies planas debido a la acción de la abrasión generada por el mar, es decir, por el oleaje y los materiales que se transportan debido a esto.

La preservación de una terraza de abrasión marina depende de los posibles cambios eustáticos en el nivel del mar, de movimientos tectónicos y la erosión posterior a su formación. Un cambio eustático del nivel marino afecta a una terraza marina preservándola en el caso de una regresión o destruyéndola en el caso de una transgresión. En el caso de movimientos tectónicos verticales descendentes producen la degradación de la terraza marina. Además, posterior a su emersión, las terrazas son afectadas por los agentes de erosión y meteorización que producen su degradación e incisión (Rodríguez, 2008).

Lagos (2015) observó en terreno que las degradaciones e incisiones se generan desde la línea de costa hacia el oeste, por el estero El Sauce y quebradas aledañas. De la Figura 2-5 se observa que el ensanchamiento del estero es mayor hacia la línea de costa y se aprecian canales colgados de segundo orden. Lo anterior se puede relacionar con los alzamientos posteriores a los 2,7 Ma (Farías 2007; Rodríguez, 2008). Lo anterior habría generado la activación de los procesos erosivos de las vertientes hacia los *talwegs*, incrementando también la capacidad de incisión de estos, producto del cambio de nivel de base, generando las gargantas epigénicas.

Los diferentes niveles de terrazas marinas se correlacionan a las máximas transgresiones de mar hacia el continente, producto del descongelamiento de los glaciares a nivel planetario. Sin embargo, las alturas actuales de estas se deben al sollevamiento neo-tectónico (Araya - Vergara 2000; Paskoff, 2000). En la zona de estudio se observa que las alturas varían desde los 40 m en las zonas de mayor profundidad de la quebrada el Sauce, hasta los 200 m s.n.m en la zona de la terraza marina más elevada. Dichos valores se pueden correlacionar con los estudiados por Rodríguez (2008), en los que se asigna la presencia de un tercer nivel de terrazas marinas (T3) como se observa en la Figura 2-6.



Figura 2-5 En la imagen se aprecia el ensanchamiento hacia la línea de costa del Estero el Sauce, zona de San Antonio. Lagos (2015).

Como se observa en la Figura 2-7, la zona de Malvilla posee pendientes que varían principalmente entre los  $0 - 25^\circ$  ( $0 - 46,63\%$ ), con algunas excepciones en que las quebradas más profundas ubicadas al oeste del área de estudio, en las que se alcanza  $50^\circ$  de pendiente ( $119,2\%$ ).

La zona de cultivo en esta zona se encuentra sobre el nivel base, el cual esta aproximadamente a 30 m s.n.m, y las plantaciones se ubican en torno a los 200 m s.n.m. Además, el área se encuentra en un interfluvio, lo que genera que el material se erosione y transporte hacia las zonas más bajas. El nivel freático también se modifica, lo que favorecería a un mayor escape de cationes y agua hacia los cursos de agua aledaños (Lagos, 2015).

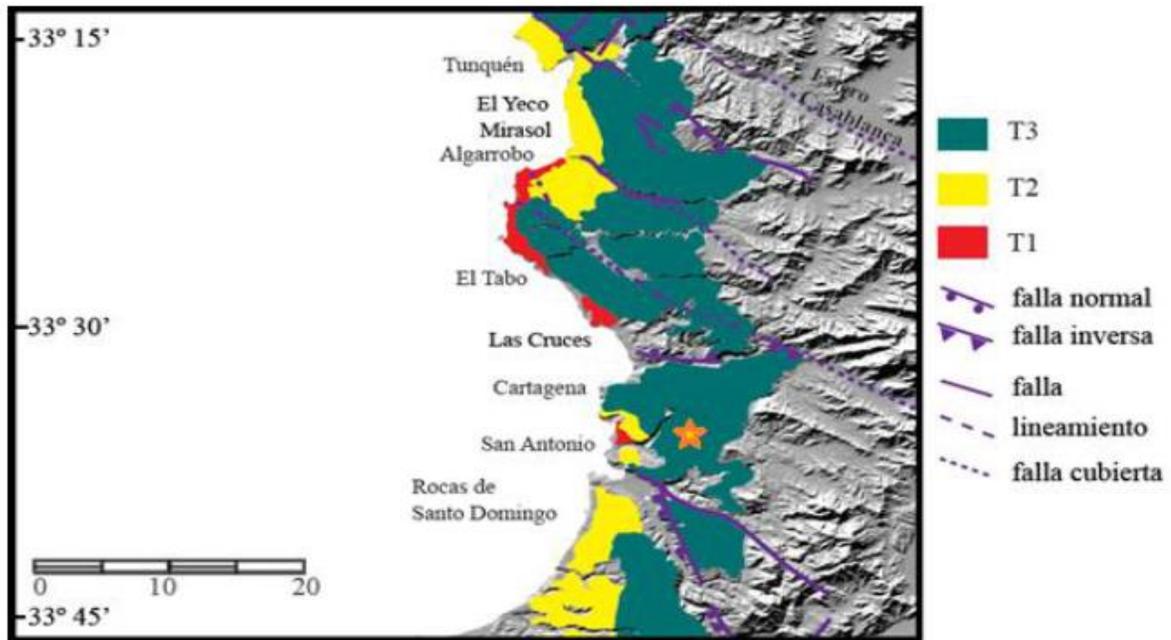


Figura 2-6 Niveles de terraza marina. La zona de estudio se encuentra ubicada en T3. Imagen modificada de Rodríguez (2008) por Lagos (2015). La estrella en naranja indica el área donde está ubicado el presente estudio.

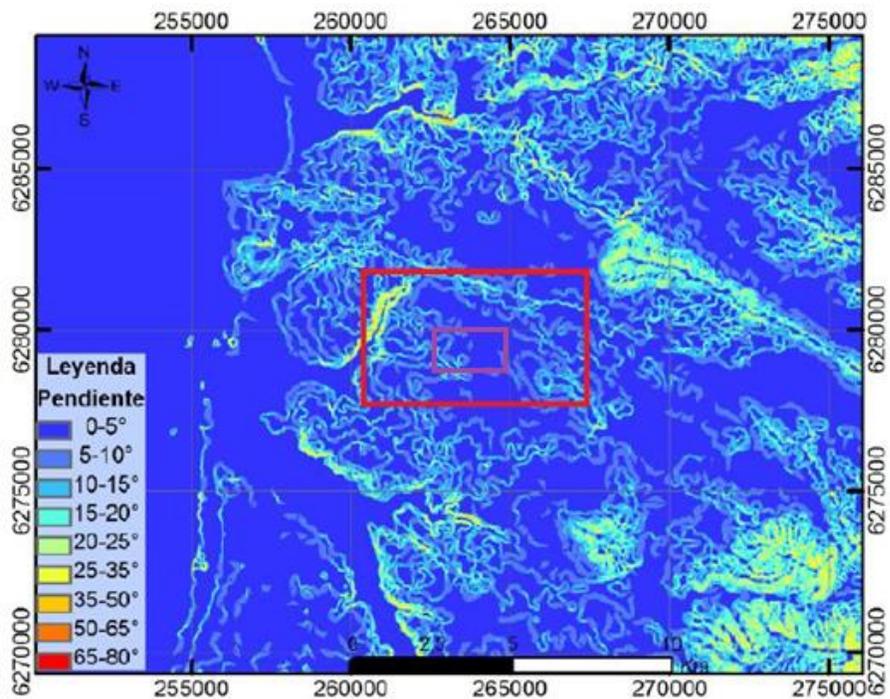


Figura 2-7 Mapa de pendientes de la zona de Malvilla. El área de estudio se encuentra encerrada en el cuadro morado. Imagen modificada de Lagos (2015). El área de estudio se encuentra enmarcada por el cuadro violeta.

## 2.5 Marco geológico

### 2.5.1 Mapa geológico del área de San Antonio-Melipilla (Gana et al, 1996)

La geología de la zona se encuentra levantada a escala 1:100.000 en el Mapa geológico del área de San Antonio-Melipilla, perteneciente a la hoja de Santiago (Wall et al., 1996) como se observa en la Figura 2-8. A continuación se exponen las características principales de las litologías encontradas en la zona de estudio.

#### 2.5.1.1 Rocas estratificadas

##### **(QTt) Terrazas de abrasión, ¿Plioceno? (Gana et al., 1996)**

Estas unidades geomorfológicas se preservan en la zona costera, a cotas que varían entre los 60 a 290 m s.n.m. Su origen es marino, constituyéndose por terrazas de abrasión sin cubierta sedimentaria, terrazas con cubierta de arenas cuarzosas, arenas negras con acumulaciones de minerales pesados de origen litoral (Wall et al., 1996) y terrazas con cubierta aluvial.

##### **(Tn) Formación Navidad, Mioceno-Plioceno (Gana et al., 1996)**

La Formación Navidad corresponde a una secuencia sedimentaria fosilífera, medianamente consolidada, constituida por limolitas, areniscas arcillosas, areniscas de grano muy fino a muy grueso, bancos conglomerádicos, areniscas muy finas de tonalidades grises y, bancos de coquinas y calizas.

La base de esta formación ha sido ampliamente estudiada por su contenido faunístico y valor cronoestratigráfico de edad Mioceno (Tavera, 1979; Covacevich y Frassinetti, 1986). Es de carácter litoral en la base, evidenciando una tendencia transgresiva. Se dispone sobre granitoides paleozoicos y triásico-jurásicos, y, se encuentra cubierta por depósitos eólicos, aluviales y suelos cuaternarios.

Se han documentado variaciones tanto verticales como horizontales y su disposición general es subhorizontal con una potencia máxima de 500 m, al sur del río Rapel (Tavera, 1979). Engrana hacia el este con depósitos transicionales y continentales de la unidad TQpa, definidos como los Estratos de Potrero Alto (Wall et al., 1996).

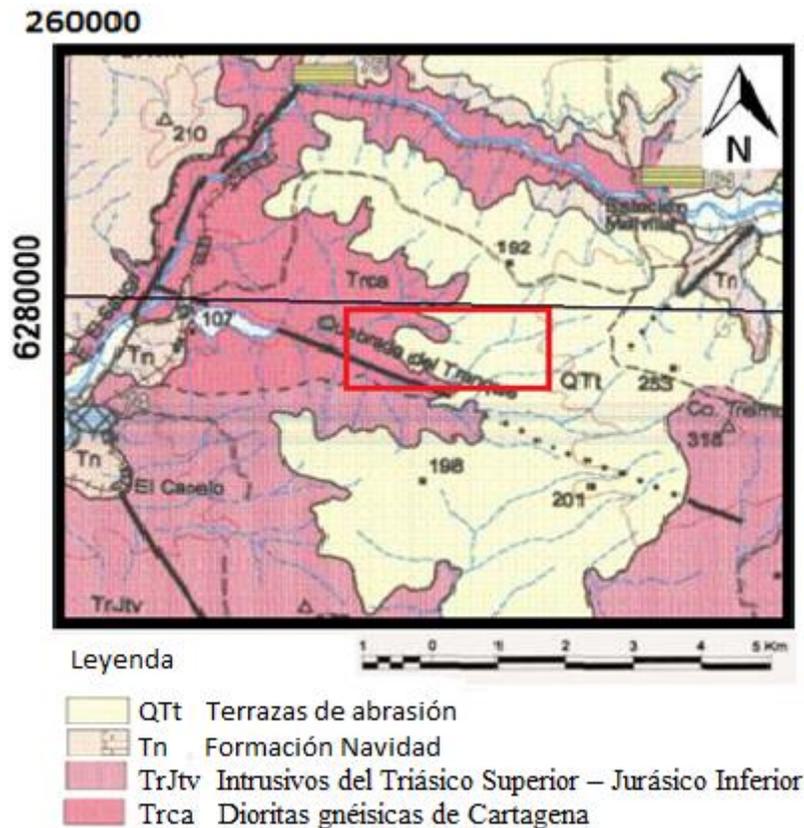


Figura 2-8 Mapa de la geología de la zona de estudio presentes en Gana et al., (1996), en rojo se enmarca la zona de estudio del presente trabajo. Imagen modificada de Gana et al., (1996).

En la zona de Lo Abarca estarían representados los estratos intermedios de edad Mioceno Superior – Plioceno Inferior, avalados por el contenido de *Ancistromesus fuenzalidal*, *Calyptraea aff. Trachiformis*, *Chlamys calderensis*, *Chlamys simposi*, *Ostrea máxima* y *Amiantis domeykoana* (Covacevich y Frassinetti, 1990).

### 2.5.1.2 Rocas intrusivas

#### (TrJrv) Intrusivos del Triásico Superior – Jurásico Inferior (Gana et al., 1996)

Esta unidad se encuentra conformada por sienogranitos de biotita y monzogranitos de biotita y anfíbol. Su coloración es gris claro y el grano varía de medio a fino, presentando deformación cataclástica.

Presenta una alteración avanzada a montmorillonita, sericita, clorita y epidota en la zona, en conjunto con una geoquímica que clasifica estos cuerpos como intrusivos, de rocas calcoalcalinas muy diferenciadas (70 – 78 % de SiO<sub>2</sub>), moderadamente peraluminosas a peraluminosas, del tipo I (Gana et al., 1996).

Edades K-Ar en biotita datan estas rocas en  $212 \pm 5$  Ma y  $184 \pm 4$  Ma (Wall et al., 1996) ubicándolas en el lapso Triásico Superior – Jurásico Inferior.

### **(Trca) Dioritas gnéicas de Cartagena (Wall et al., 1996)**

Forma parte de un plutón de exposición continua entre los esteros Cartagena y El Sauce, corresponde a un conjunto de rocas intrusivas compuestas por dioritas gnéicas, anfibolitas, dioritas y gabros parcialmente metamorfizados, de color gris oscuro, grano fino a medio y textura hipidiomórfica a alotromórfica granular.

La geoquímica publicada (Wall et al., 1996) clasifica a estos intrusivos como calcoalcalinos, metaluminosos, tipo I; existen dataciones mediante U/Pb en circones que arrojan edades de cristalización de  $214 \pm 1$  Ma (Gana y Tosdal, 1996) y de rejuvenecimiento por el magmatismo Jurásico mediante el método K/Ar en biotita de 181 Ma.

### **2.5.2 Estudio geológico, petrográfico y granulométrico del material parental de suelos vitivinícolas de la zona Central de Chile (Contreras (2015))**

Contreras (2015), realizó un estudio petrográfico en la zona, en la cual reconoció las siguientes unidades geológicas: Dioritas Metamorfizadas (Trd), Unidad San Antonio (TrJg) integrada por las subunidades Ortogneis (TrJg(a)), Tonalitas (TrJg (b)) y Pórfido Tonalítico (TrJg(c)). Secuencia Malvilla (Msm), compuesta por las subunidades: Conglomerados y areniscas (Msm(a)) y Coquinas (Msm (b)), y Depósitos fluviales (Qf). En la Figura 2-9 se observa el mapa geológico confeccionado a partir de las unidades geológicas definidas por Contreras (2015).

### 2.5.2.1 Rocas Sedimentarias

#### **Msm Secuencia Sedimentaria Malvilla**

Secuencia sedimentaria marina-fosilífera medianamente consolidada compuesta por areniscas de grano muy fino a muy grueso, bancos de conglomerados y coquinas. Esta secuencia se correlaciona con la formación Navidad (Gana *et al.*, 1996).

#### **Msm (a) Conglomerados y Arenisca**

Se compone de areniscas y conglomerados, que presentan gradaciones normales e inversas, además de imbricación de clastos en algunos niveles conglomerádicos. Los conglomerados corresponden a un depósito polimíctico que presenta una mala selección y matriz clasto soportada. Los clastos presentan una variación de diámetro que varía desde los 10 a los 80 cm de diámetro, en la cual predominan los clastos de granitoides y gneis de tonalitas y granodioritas foliadas, posiblemente provenientes del basamento triásico-jurásico de la zona.

#### **Msm (b) Coquinas**

Corresponde a una intercalación de areniscas gruesas, conglomerados y coquinas. Se reconocen bancos de conglomerados polimícticos, con la presencia principal de clastos de rocas metamorfizadas, dioritas y tonalitas. Además, se reconocieron ostras en los afloramientos de coquinas. Esta subunidad se caracteriza químicamente por un bajo contenido de SiO<sub>2</sub> (17,6%), muy alto valor de CaO (41%) y prominentes concentraciones de C total (8,8%) y S total (0,06%).

### 2.5.2.2 Rocas intrusivas

#### **Trd Dioritas metamorfizadas**

Cuerpo intrusivo de amplia extensión, se describe como una metadiorita cuarcífera de hornblenda y metadiorita de biotita y hornblenda. Su textura es hipidiomórfica granular de grano medio a grueso con cristales desde 0,5 a 5 mm de diámetro. Químicamente se caracterizan por un contenido de 62% de SiO<sub>2</sub>, además de presentar un enriquecimiento con respecto a la corteza superior (Rudnick y Gaos. 2003) en Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, CaO, Na<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub> y MnO (Castillo *et al.*, 2015). Se correlaciona con las Dioritas Gnéisicas de Cartagena descritas por Gana et al (1996).

## TrJg Unidad San Antonio

Unidad que a nivel regional se correlaciona con la unidad de granitoides de edad triásico – jurásico (212-280 Ma) que aflora desde la III a la V región de Chile (Sernageomin, 2003). También se correlaciona con los sienogranitos de biotita, monzogranitos de biotita y anfíbol (TrJtv) definidos por Gana *et al.*, (1996).

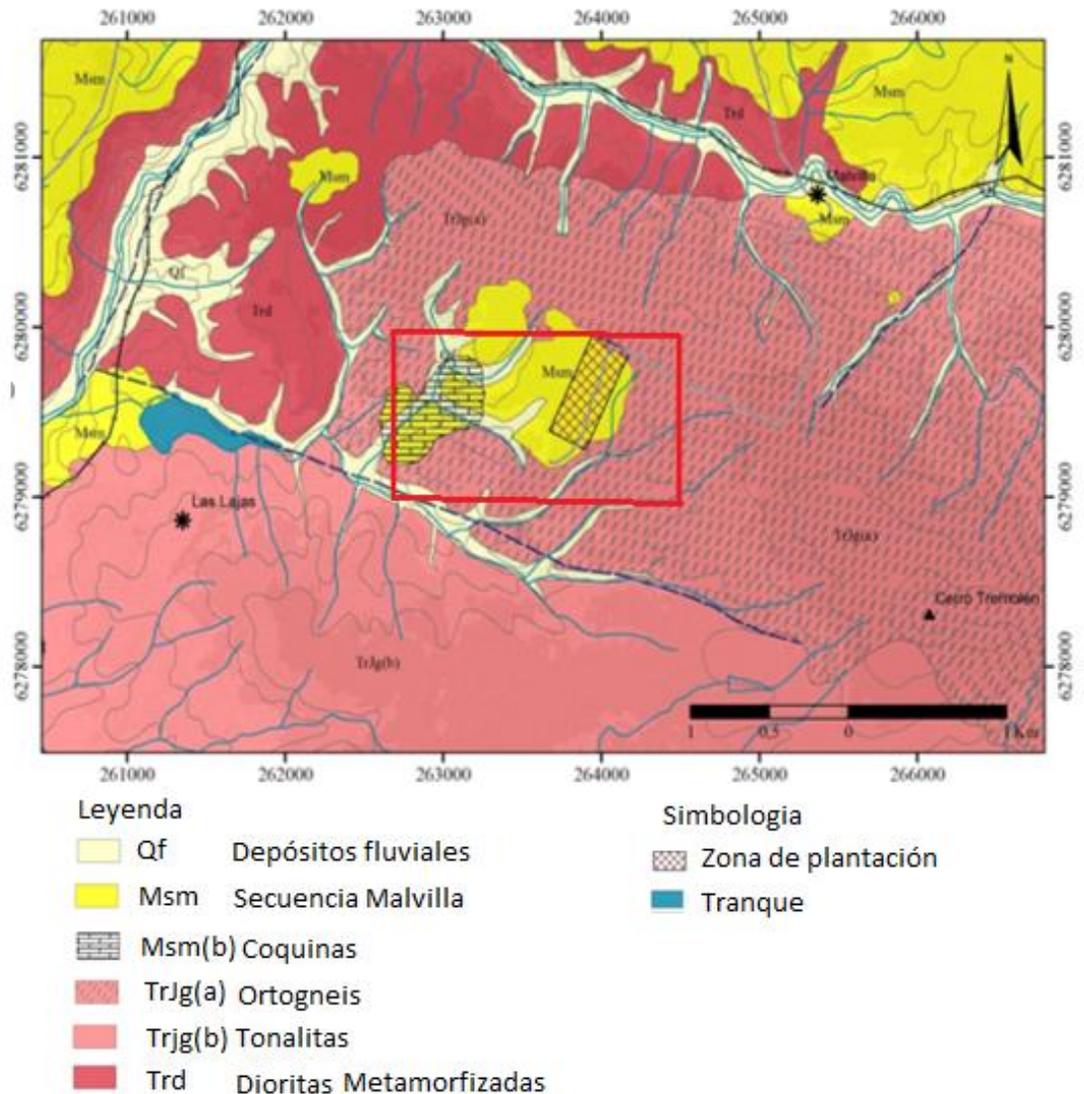


Figura 2-9 Mapa de la geología de la zona de estudio presente en Contreras (2015), en rojo se enmarca la zona de estudio del presente trabajo. Imagen modificada de Contreras (2015).

### **TrJg (a) Ortogneis**

Subunidad que se conforma por rocas metamórficas que afloran en los bordes de la línea del tren. Presentan una leve a moderada alteración. Litológicamente consisten en ortogneis tonalítico de biotita y ortogneis de biotita rico en cuarzo de grano medio a fino, localmente grueso, con tamaños de cristales desde 0,3 a 5 mm de diámetro. Se observan texturas bandeadas con franjas de minerales máficos (biotita y hornblenda) y minerales félsicos (cuarzo, plagioclasa, entre otros). Las rocas, además, contienen muscovita primaria, junto con epidota y zircón como minerales accesorios, con una alteración moderada a sericita y moderada a intensa a arcillas.

### **TrJg (b) Tonalitas**

Subunidad conformada por un cuerpo tonalítico bandeado que afloran en los bordes de la línea del tren, mostrando una leve alteración. Consisten de tonalita bandeada de biotita y tonalita bandeada de hornblenda y biotita, exhiben una textura hipidiomórfica granular de grano medio moderadamente bandeada. Químicamente, se caracterizan por poseer un alto contenido de sílice (60 a 75%), además de un enriquecimiento en  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  y menor porcentaje en  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$  y  $\text{TiO}_2$  (Castillo *et al.*, 2015), en relación a los valores de la corteza superior (Rudnick y Gaos, 2003).

### **TrJg (c) Pórfido tonalítico**

Cuerpo subvolcánico de extensión restringida. Se define como un pórfido tonalítico de biotita con una textura porfídica con masa fundamental halotromórfica granular de grano medio.

#### **2.5.2.3 Depósitos no consolidados**

Corresponden a sedimentos no consolidados de cursos fluviales activos y abandonados. Para los primeros, predominan las facies de canal, constituidos por gravas clasto soportados con bolones redondeados. Ambos contienen gravas, arenas y limos en variables proporciones.

## 2.6 Suelos

Según Cosio et al., (2007) en la zona de estudio de Malvilla se puede encontrar suelo del tipo Matanzas, definido por Luzio (1972), el cual se caracteriza por ser un suelo sedimentario en lomajes suaves a moderadamente ondulados con suelo superficial de características franco arcillo arenoso y arcilloso en profundidad, de colores pardo rojizo a lo largo de todo el del perfil. Poseen un substrato de arenas graníticas ricas en cuarzo. El drenaje de estos suelos es moderado y muy profundo, sin embargo, la profundidad efectiva puede llegar a ser limitante, especialmente en las laderas expuestas a erosión.

Según información proporcionada por el mismo viñedo, la zona en la cual actualmente se encuentra las plantaciones de vid (Figura 2-10), no corresponde a un suelo perteneciente a la zona, es decir, el material de aquella zona no posee un origen litogénico o pedogénico, por el contrario, el material corresponde a un suelo trabajado proveniente de una fuente externa, por lo tanto, posee una contribución antropogénica de alto impacto.

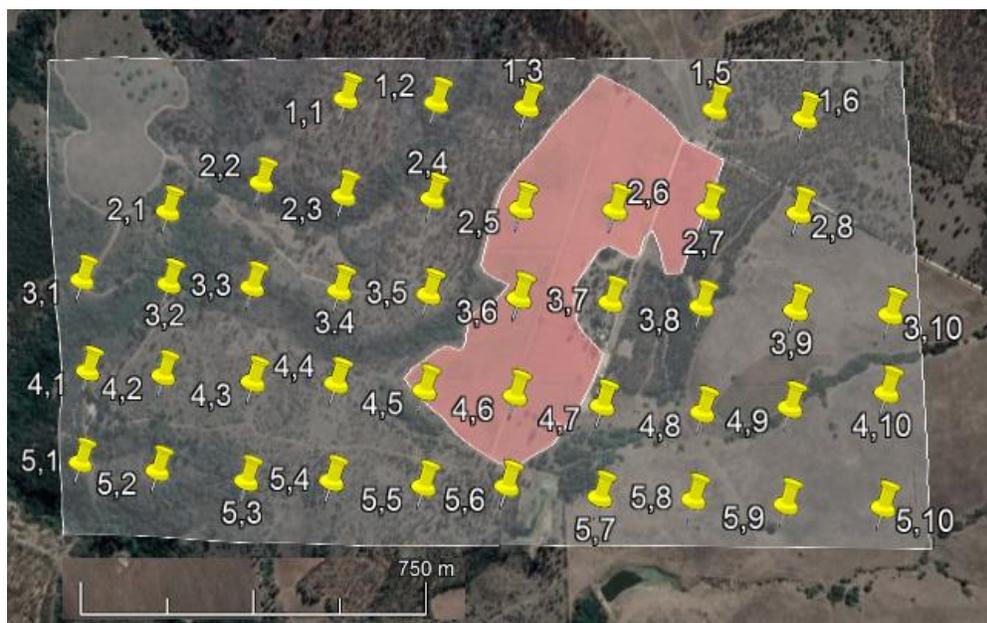


Figura 2-10 En rojo, ubicación de la zona destinadas a plantación de vid. Imagen modificada de Google Earth Pro.

Lagos (2015) realizó un estudio granulométrico en muestras del sector en suelos superficiales desarrollados sobre el mismo material parental de la Formación Navidad (30 cm de profundidad) (Figura 2-11).

Se observa en la Figura 2-11, que la muestra de suelo CS-1A, posee aproximadamente de un 7% de partículas de tamaño limo/arcilla, 28% de partículas arena fina, 48% de arena media, 6%

de arena gruesa. La muestra CS-2A, posee aproximadamente un 11% de partículas de tamaño limo/arcilla, 32% de arena fina, 52% de arena media, 4% de arena gruesa y 1% de gravas. Finalmente, la muestra SC-12A, se compone aproximadamente de un 8% de partículas de tamaño limo/arcilla, 31% de arena fina, 45% de arena media, 10% de arena gruesa y un 5% de gravas.

A modo de resumen, los suelos analizados de la zona de Malvilla se encuentran caracterizados por una predominancia de material tamaño arena media, compuestos aproximadamente de un 50% de dicho material, además de presentar todos menos de un 5% de material de tamaño grava (3/8'' de malla).

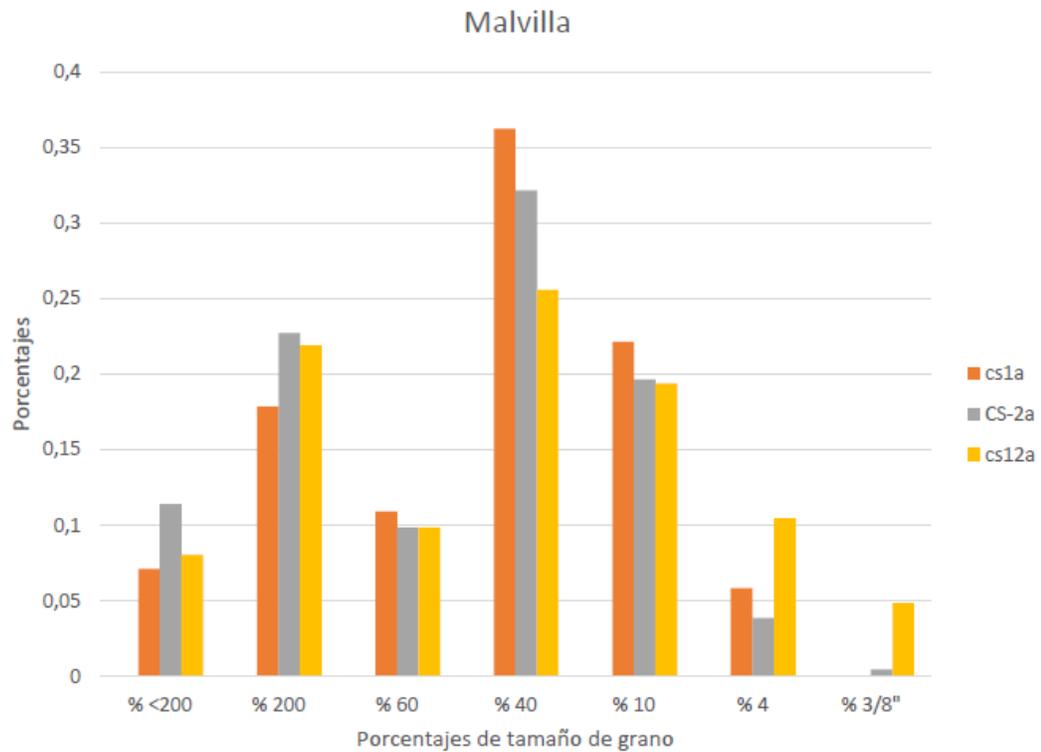


Figura 2-11 Histograma de distribución con el tamaño de las muestras predominantes en círculo rojo. Lagos (2015).

## 3. Metodología

A continuación, se presenta la metodología empleada para cumplir los objetivos mencionados con anterioridad. Destacar que un aspecto de relevancia de este trabajo es que solo considero labores de gabinete.

### 3.1 Recopilación bibliográfica de la zona de estudio

Primeramente, el trabajo se enfocó en la recopilación de antecedentes en lo que respecta a la geología, geomorfología, geoquímica, petrología, estratigrafía, pedología, edafología, etc, de la zona de estudio.

### 3.2 Metodología de muestreo y terreno

Los datos procesados fueron obtenidos durante el desarrollo del curso Geoquímica Aplicada del Departamento de Geología. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, semestre Primavera 2015. Para el trabajo presente, la metodología descrita en los puntos 3.2.1; 3.2.2 y 3.3.1 corresponde a la metodología presente en el informe de “Estudio Geoquímico de la Viña Malvilla, San Antonio, Quinta Región, Chile” (Arellano et al., 2015).

#### 3.2.1 Grilla de muestreo

La grilla de muestreo propuesta para la zona de estudio se configuró de una malla de muestreo equidistante de 200 metros, tanto en la vertical como en la horizontal, configurándose en 5 filas y 10 columnas, de las cuales las dos primeras filas no se encuentran completas. La nomenclatura de las muestras es de la forma “númerofila.númerocolumna”. En su totalidad, la grilla se compuso de 44 puntos, de los cuales solo se pudieron extraer muestras de 43 de estos (Figura 3-1).

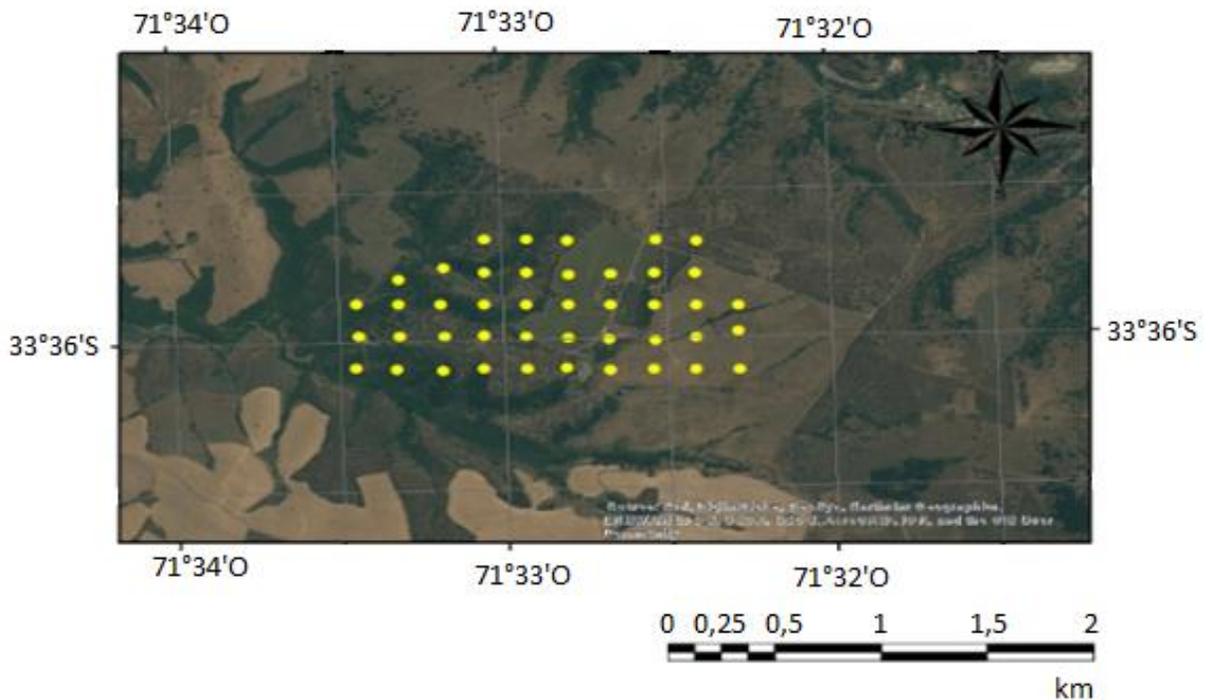


Figura 3-1 Mapa de la zona de estudio y disposición de la grilla de muestreo. Imagen modificada de Google Earth Pro.

### 3.2.2 Selección de muestras

El procedimiento de la toma de las muestras consistió en la limpieza superficial del suelo, para luego realizar una calicata de  $1 \times 1 \text{ m}^2$  y 40 cm de profundidad, con la ayuda de pala y chuzo. Luego de realizada la calicata, se procedió a la toma de muestra propiamente tal y a la descripción macroscópica de esta. La toma de muestra se realizó con una pala de jardinería, la cual era ambientada con el suelo que se extrajo para realizar la calicata. El primer incremento tomado era descartado para evitar contaminación cruzada. Se realizaron los incrementos necesarios para obtener una muestra de 1 kg aproximadamente. Para esto, cada incremento fue tomado aleatoriamente de la calicata, distribuido de manera que la muestra final sea representativa del lugar. Las muestras fueron guardadas en bolsas de género y previo a esto, fueron tamizadas con un colador de PVC para evitar su contaminación. Se tomaron 5 duplicados en puntos previamente acordados para realizar el posterior control de calidad.

### 3.3 Metodología de laboratorio

#### 3.3.1 Preparación de muestras y procesamiento de datos

Tres muestras no pudieron ser tamizadas en terreno debido a su alto grado de humedad, por lo cual, se procedió a secarlas en el horno del laboratorio de Sedimentología. Una vez realizado este trabajo, la totalidad de muestras fueron enviadas al Laboratorio Bureau Veritas en Vancouver, Canadá, lugar donde se les realizó la digestión 4 ácidos y análisis mediante ICP-OES-MS (combinando análisis óptico y de masa).

#### 3.3.2 Adquisición y procesamiento de datos

Para la caracterización geoquímica del sistema suelo-sustrato se analizaron la concentración de un total de 59 elementos químicos (Tabla 3-1), de un total de 43 puntos de muestreo distribuidos en la zona de estudio. Los datos obtenidos de laboratorio fueron procesados mediante el Software IO-GAS.

*Tabla 3-1 Elementos mayores y trazas considerados en el presente estudio.*

Elementos mayores	Fe, Ca, P, Mg, Ti, Al, Na, K.
Elementos traza	Mn, Mo, Cu, Pb, Zn, Ag, Ni, Co, As, U, Th, Sr, Cd, Sb, Bi, W, Zr, Sn, Be, Sc, S, Y, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Li, Rb, Ta, Nb, Cs, Ga, In, Re, Se, Te, Tl.

#### 3.3.3 Control de calidad y validación de datos

##### 3.3.3.1 Límite de detección

El tratamiento de los datos comenzó con la eliminación de todas las variables que presenten un porcentaje de muestras con valores bajo el límite de detección mayor a un 50%.

Acorde con el criterio anteriormente mencionado, se eliminaron del total de 59 elementos los siguientes: Azufre (S) y Renio (Re).

Para los elementos que presenten más del 50% de los datos con respuesta analítica, pero con algunos bajo el límite de detección, su valor fue remplazado por la mitad del límite de detección. (Reimann et al., 2008). Los elementos que presentaron valores bajo el límite de detección se exponen en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2 Elementos bajo el límite de detección

Elemento	LD	N < LD	% N < LD
S	400 ppm	43	97.7
Re	0.002 ppm	27	61.4
Te	0.05 ppm	13	29.5
Be	1 ppm	10	22.7
Se	0.3 ppm	9	20.5
Ag	20 ppb	1	2.3

### 3.3.3.2 Validación datos de terreno

Para la validación o, mejor dicho, para la determinación del nivel de confianza de una base de datos de concentración de elementos, se debe realizar un control de calidad sobre esta. Dicho control de calidad se realizó mediante el empleo de duplicados de terreno y muestras estándares mediante el cálculo del error analítico (Ecuación 3-1), en la cual, CVd% corresponde al coeficiente de variación de los duplicados. Por su parte, CVe% corresponde al coeficiente de variación de las muestras estándares, para su obtención, se emplean las siguientes formulas (Ecuación 3-2 y 3-3, respectivamente).

$$Error = \sqrt{\frac{(CVd\%)^2 + (CVe\%)^2}{2}}$$

Ecuación 3-1 Error analítico

$$CVd\% = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{(x_{1i} - x_{2i})^2}{(x_{1i} + x_{2i})^2} \right)} \times 100$$

Ecuación 3-2 Coeficiente de variación de duplicados

$$CVe\% = \frac{\sigma_e}{\mu_e}$$

*Ecuación 3-3 Coeficiente de variación muestras estándares*

Para el caso de CVd%, n corresponde al número de pares duplicados y  $(x_{1i}, x_{2i})$  a la concentración de un cierto elemento con respecto a la muestra original-duplicado. Por su parte, para el caso de CVe%,  $\sigma_e$  y  $\mu_e$  corresponden a la desviación estándar y media aritmética de las muestras estándar, respectivamente.

Las variables que posean un error analítico menor al 10% se consideran como analíticamente confiables, mientras aquellas que posean un error analítico superior al 10% se consideran como no confiables y fueron descartadas del presente estudio.

Para el total de 43 muestras tomadas en terreno se levantaron 5 duplicados, que corresponde a un 11,4% del total de muestras. Además, se levantaron 4 muestras estándares, que en conjunto con los duplicados fueron empleados para el cálculo del error analítico.

Acorde con el criterio anteriormente mencionado, de la totalidad de 57 elementos que aprobaron el control de calidad se eliminaron los siguientes: Cadmio (Cd), Berilio (Be), Lutecio (Lu), Selenio (Se) y Teluro (Te). (Tabla 3-3). Para la totalidad de elementos, los resultados obtenidos del cálculo del error analítico se exponen en el Anexo I.

*Tabla 3-3 Elementos descartados en el presente estudio.*

Elemento	Error analítico
Be	37.2%
Cd	22.1%
Te	17.8%
Se	13.4%
Lu	12.7%

### 3.3.4 Validación de base de datos

A continuación, en la Tabla 3-4, se presentan los 52 elementos validados, 9 elementos mayores y 43 elementos traza, con los cuales se trabajó en este estudio. Las concentraciones de los elementos validados y descartados se despliegan en el Anexo II.

Tabla 3-4 Elementos validados en el presente estudio.

<b>Elementos mayores</b>	Fe, Ca, P, Mg, Ti, Al, Na, K.
<b>Elementos traza</b>	Mn, Mo, Cu, Pb, Zn, Ag, Ni, Co, As, U, Th, Sr, Sb, Bi, W, Zr, Sn, Sc, S, Y, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Hf, Li, Rb, Ta, Nb, Cs, Ga, In, Tl.

### 3.4 Metodología de análisis de resultados

#### 3.4.1 Línea base

Tomando en cuenta los objetivos propuestos con anterioridad, la metodología utilizada en este trabajo se encuentra basada en el trabajo de Aliaga (2016), el cual sintetiza los pasos que deben ser desarrollados para una caracterización geoquímica de suelos.

Entre los objetivos del trabajo anteriormente mencionado se encuentra la determinación de la concentración y distribución espacial elemental de los distintos elementos químicos de interés, estableciendo rangos que permitan establecer una línea base geoquímica, definiendo la mediana de las concentraciones elementales y el rango de concentraciones anómalas a fin de poder determinar la presencia posible de suelos empobrecidos o enriquecidos en ciertos elementos, como también de anomalías. Además, dilucidar las posibles fuentes de proveniencia para los distintos elementos, distinguiendo entre orígenes antropogénicos o naturales (litogénico o pedogénico).

Para llevar a cabo los objetivos mencionados con anterioridad, se recurrió a la utilización de herramientas estadísticas univariable y multivariable. En lo que respecta a las herramientas univariadas, se hicieron uso de *box plots*, mapas de concentración y factor de enriquecimiento. Por su parte las herramientas multivariadas consistieron en el empleo de coeficientes de correlación múltiple, análisis de componentes principales y análisis factorial.

#### 3.4.2 Estadística univariable

##### 3.4.2.1 Análisis exploratorio de datos

Hay que tener en cuenta que para datos que han sido recolectados en un espacio geográfico delimitado, se debe tener en consideración dos tipos de distribuciones: la distribución estadística de los valores medidos y la distribución espacial de los datos en el área de estudio (Reimann et al., 2008).

La distribución estadística se determinó mediante el análisis exploratorio de datos para las variables que poseen un nivel de confianza razonable, mediante la determinación de estadígrafos

básicos, como, por ejemplo, valores máximos/mínimo, media, mediana, percentiles principales (25 y 75) y coeficiente robusto de variación (%CVR).

La distribución espacial de los datos se obtuvo mediante la utilización de mapas univariable de concentración de elementos químicos. Mediante esto, se observan los quiebres naturales que presenta la base de datos.

### 3.4.2.2 Muestras “*outliers*”

La detección de datos “*outliers*” y el comportamiento anómalo de estos, es una de las tareas de vital importancia del análisis estadístico de datos geoquímicos. Para determinar dichos valores, existen dos métodos principalmente (univariable y multivariable), ambos métodos toman en consideración la escala, distribución espacial y parámetros estadísticos de los datos (Reimann et al., 2008). Es importante destacar que, dado que los datos anómalos pueden representar una importancia crítica en el análisis geoquímico de un estudio, es necesario realizar un razonamiento caso a caso, además de apoyarse de parámetros estadísticos o gráficos.

La identificación de datos *outliers* se basa en que los valores anómalos se consideran como datos puntuales, es decir no representan una población de datos, por lo tanto, son valores anómalos para la variable unitaria utilizada. Debido a la importancia en la información proporcionada por dichos valores es que se mantienen en la base de datos.

Se reconocieron como *outliers* a los valores que sean mayores al parámetro  $Q3 + 1,5 * RI$ , en el parámetro anterior, RI corresponde al rango intercuartílico y Q3 al tercer quintil para un elemento determinado.

### 3.4.2.3 Análisis Box-Plot

Los diagramas de tipo *Box-Plot* (*Diagrama de caja y bigote*), definido por Tukey (1977), son una herramienta de la estadística descriptiva que permite representar como se distribuye una variable con respecto a los valores máximo, mínimo, mediana (Q2), y los cuartiles 1 (Q1, 25% de los datos) y 3 (Q3, 75% de los datos), además entrega información sobre la existencia de valores anómalos (*outliers*) y la simetría de la distribución.

El análisis Box-Plot se construye en base a la Mediana (Q2) de la distribución, variable que divide cualquier set de datos en dos mitades iguales. A partir de los percentiles 25 y 75 (Q1 y Q3) se define una nueva variable denominada Rango Intercuartílico (RI), la cual contiene aproximadamente el 50% de los datos. El RI define la longitud de la caja (*box*). Dos nuevas variables se construyen en base a los datos que proporciona la distribución. Estas son el Límite Inferior (LI) y Superior (LS). Estos límites indican que los valores que se ubiquen más allá de estos,

serán considerados como valores extremos o anómalos (*outliers*). Hay que aclarar que los valores utilizados para LI y LS no necesariamente son valores que se encuentren dentro del set de datos. Para solucionar dicho problema se definen dos nuevas variables, denominadas Bigote Superior (BS) e Inferior (BI), que se definen como el valor más cercano a los límites (LI y LS) dentro de los datos presentes en la distribución. A continuación, se presenta un ejemplo gráfico del diagrama box-plot teórico (Figura 3-2).

### 3.4.2.4 Distribución elemental espacial

Los mapas de concentración de puntos fueron obtenidos mediante el empleo de diagramas compuestos, que involucra el empleo de histogramas, *box plots* y *raster* de interpolación.

El *raster* de interpolación fue creado mediante la herramienta *Spline* presente en el software ArcGis 10 (ESRI). La herramienta *Spline* se basa en la interpolación mediante la utilización de una función matemática que minimiza la curvatura general de la superficie, lo que genera una superficie suavizada que coincide con los datos de entrada.

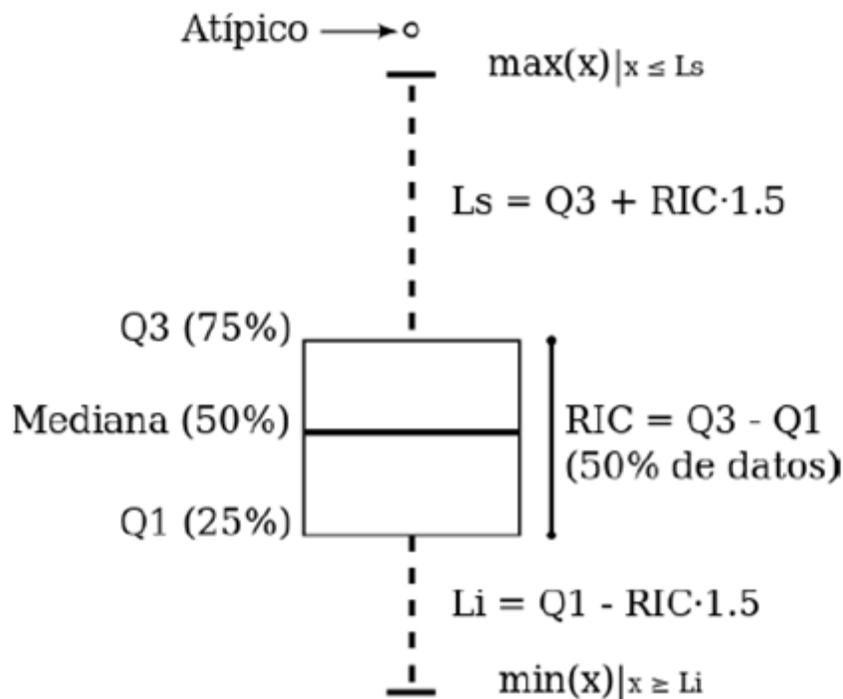


Figura 3-2 Diagrama Box-Plot teórico (Aliaga, 2016).

### 3.4.2.5 Factor de enriquecimiento

El análisis del factor de enriquecimiento tiene como fin el establecer la posible influencia de las fuentes naturales y antrópicas en las concentraciones medidas de los elementos analizados. Este método se desarrolló inicialmente para ser utilizado en estudios atmosféricos, de aguas lluvia o de agua marina (Chester and Stoner, 1973; Zoller *et al.*, 1974). Progresivamente su uso fue extendido al estudio de suelos o sedimentos lacustres entre otros (Loska *et al.*, 1997). A pesar de los cuestionamientos realizados por algunos autores (ver 5.2.1), el presente estudio considera al factor de enriquecimiento, una herramienta útil para una fase exploratoria de las posibles fuentes que pueden estar impactando el área de estudio. El uso de este factor otorga una primera orientación, la cual es evaluada junto a una serie de análisis, espaciales y estadísticas.

La fórmula para calcular el factor de enriquecimiento (FE) se puede generalizar a partir de Chester and Stoner, (1973); Zoller *et al.*, (1974) (Ecuación 3-4).

$$FE_{elemento\ x} = \frac{\left[ \frac{C_{elemento\ x}}{C_{elemento\ referencia}} \right]_{muestra}}{\left[ \frac{C_{elemento\ x}}{C_{elemento\ referencia}} \right]_{corteza\ continental}}$$

Ecuación 3-4 Factor de enriquecimiento.

El FE se basa en la normalización de las concentraciones elementales del elemento a evaluar (Elemento x) con respecto a un elemento conservativo representativo de la corteza superficial (Elemento referencia), el cual puede ser Al, Th o Zr, elegidos por su estabilidad en la mayoría de los procesos ambientales. Posteriormente, los valores se comparan con su equivalente representativo natural normalizado, obtenido a partir de valores referenciales del medio geológico. Para estos efectos se utilizó la compilación de Taylor & McLennan (2009) como referencia (Anexo III).

Los resultados obtenidos en el análisis de FE permiten reconocer diferencias en el nivel de influencia de la fuente en el origen de los elementos según tres categorías distintas, las cuales se detallan en el cuadro a continuación (Tabla 3-5).

Tabla 3-5 Criterio de análisis para factor de enriquecimiento.

Rango	Origen
<b>FE&lt;1</b>	Natural, litogénico
<b>1&lt;FE&lt;10</b>	Fuentes naturales como antrópicas
<b>FE&gt;10</b>	Importante contribución antropogénica

### 3.4.3 Estadística multivariable

#### 3.4.3.1 Análisis de correlación múltiple

El análisis de correlación múltiple estima el grado de linealidad que existe entre dos variables distintas. Para lo cual, se hace cálculo de la matriz de correlación de Pearson. El cálculo de esta matriz se basa en la determinación del coeficiente (**Corrx-y**), el cual se define como la división de la covarianza entre las dos variables por el producto de las desviaciones estándar de cada variable (Ecuación 3-5).

$$Corr_{x-y} = \frac{Cov_{x-y}}{\sigma_x * \sigma_y}$$

Ecuación 3-5 Coeficiente de correlación de Pearson

Para un par de variables, el valor del coeficiente de correlación, puede tomar valores entre -1 y +1. Si la relación entre ambas variables es directa, el coeficiente de correlación toma valores positivos, así mismo si la relación entre ambas variables es inversa, este coeficiente toma un valor negativo. Un valor de coeficiente de correlación igual a  $\pm 1$  refleja una correlación lineal perfecta entre ambas variables, mientras que un valor igual a “cero” refleja que no existe relación lineal entre las variables. El coeficiente de correlación de Pearson es sensible a la presencia de *outliers*, como así también a la presencia de relaciones no lineales entre las variables evaluadas (Reimann *et al.*, 2008).

En general una correlación sobre  $\pm 0.5$ , indica una asociación significativa entre dos variables. No obstante, eso variará según el número de muestras, ya que, a mayor número de muestras, suelen disminuir los valores absolutos del coeficiente de correlación (Reimann *et al.*, 2008).

### 3.4.3.2 Análisis multivariable

Para realizar el análisis y detección de posibles fuentes de origen de los elementos químicos muestreados se utilizaron dos herramientas estadísticas a fin. El análisis factorial (AF) y el análisis de componentes principales (ACP), los cuales buscan identificar las variables subyacentes que puedan explicar el patrón de relaciones que existe dentro del conjunto de variables reales observadas (Reimann *et al.*, 2008). El ACP y AF se obtuvieron mediante el empleo de los *softwares* IO-GAS y XLSTAT, respectivamente.

#### 3.4.3.2.1 Análisis de componentes principales (ACP)

El ACP permite reducir la dimensionalidad de la base de datos, transformando el conjunto de variables originales  $p$  en otro grupo con un número  $q$  de variables sintéticas no correlacionadas ( $q < p$ ), que reciben el nombre de *componentes principales*. Si la base de datos consta de variables altamente dependientes entre ellas, es frecuente que un pequeño número de las nuevas variables (<20% de las variables originales) explique la mayor parte (>80%) de la variabilidad original de la base de datos (Filzmoser *et al.*, 2003).

El ACP contabiliza la máxima varianza entre todas las variables y las “ $q$ ” nuevas variables (componentes principales) se definen como combinaciones lineales de las variables originales “ $p$ ”. Las componentes se ordenan en forma decreciente en función del porcentaje de variabilidad explicada por cada una. En este sentido, la primera componente principal es aquella que explica el mayor porcentaje de la varianza de los datos. Este método siempre mostrará la estructura total en los datos (todas las variables están forzadas dentro del resultado).

#### 3.4.3.2.2 Análisis Factorial (AF)

El AF, al igual que el ACP, es una técnica estadística multivariable que busca reducir la dimensionalidad de la base de datos, a fin de explicar las relaciones entre las variables observadas en función de un número menor de variables sintéticas denominadas factores.

Propiamente tal el AF es una modificación del ACP, ya que a diferencia del ACP que está basado en la estructura de varianza de las variables, el AF está basado en la estructura de correlación de las variables. El modelo de este método permite que los factores no expliquen la variación total de los datos. Esto implica que admite la existencia de algunos únicos factores, que poseen un desarrollo completamente diferente al resto de factores (Reimann *et al.*, 2002). Esto significa que el análisis factorial se adapta mejor para encontrar estructuras comunes en los datos. De este modo, el análisis de factores es geoquímicamente más útil ya que permite detectar procesos comunes determinados por el comportamiento de los elementos (Reimann *et al.*, 2002).

Lo que se busca con el AF es, a través de las asociaciones geoquímicas (señal química), poder identificar las fuentes de las cuales proceden aquellos elementos. Para ello, se consideran aquellos elementos que tienen un factor de carga (“*loading*”) entre **|0.5| y |1|** como señales principales para cada factor en particular, además también se consideran que existen señales secundarias de elementos que tienen un factor de carga entre **|0.3| y |0.5|**. En cada factor existe la posibilidad de que se presente una asociación química principal con un factor de carga  $>0.5$  para cada elemento, al igual que una asociación geoquímica principal inversa con factor de carga  $<-0.5$  para cada elemento. Es normal que algunos elementos se repitan en diversos factores, así como también es posible que se presente más de una asociación geoquímica por factor debido a lo complejo que puede ser la señal química, la cual depende de la múltiple cantidad de fuentes existentes.

### 3.5 Comparación con normas internacionales

Para los elementos trazas que representen un potencial peligro para la calidad del suelo se llevó a cabo una recopilación de diversas directivas en lo que respecta a las concentraciones permisibles según distintas legislaciones de diferentes países. Hay que tener en cuenta que Chile actualmente no posee una norma de calidad de suelos, sin embargo, de acuerdo al artículo 7 del Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), una serie de normas internacionales son aprobadas como referencias válidas para la evaluación los puntos a) y b) del art. 11 de la Ley 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente (MINSEGPRES, 1994), que hace referencia a la salud de la población o a efectos adversos significativos sobre la cantidad y calidad de recursos renovables.

Para el presente estudio, se consideraron los valores que se encuentran en las normativas medio ambientales de suelos de los estados de Alemania, Brasil, Canadá y Holanda.

#### 3.5.1 Normativa Alemana

Los criterios establecidos para la calidad de suelos en la República Federal de Alemania están definidos en la Ley Federal de Protección de suelos y la Ordenanza de Protección de suelos (Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG), 1998). Dicha normativa considera distintos valores según la textura predominante del suelo estudiado, cuyos valores se exponen en la Tabla 3-6.

Tabla 3-6 Criterios establecidos por la República Federal de Alemania para la calidad de suelos. Modificado de Aliaga (2016).

Elemento	Tipos de suelo		
	Arcilloso	Limoso	Arenoso
	[ppm]		
<b>As</b>	20	15	10
<b>Co</b>	-	-	-
<b>Cr<sup>total</sup></b>	100	60	30
<b>Cu</b>	60	30	100
<b>Mo</b>	-	-	-
<b>Ni</b>	70	50	15
<b>Pb</b>	100	70	15
<b>Sb</b>	-	-	-
<b>V</b>	-	-	-
<b>Zn</b>	200	150	60

### 3.5.2 Normativa Estado de Sao Paulo (Brasil)

Los criterios establecidos para la calidad de suelos en el Estado de Sao Paulo (República Federativa del Brasil) están definidos por la Companhia de Tecnologia de Saneamiento Ambiental (CETESB, 2005) mediante la directriz N° 195-2005-E. Dicha normativa considera dos parámetros. El primero consiste en el Valor de Prevención (VP), que corresponde a la concentración de una determinada sustancia por encima de la cual pueden ocurrir alteraciones perjudiciales en lo que respecta a la calidad del suelo. El segundo consiste en el Valor de Intervención (VI), el cual corresponde a la concentración en suelos por encima de la cual existe un alto riesgo potencial directo e indirecto sobre la calidad de la salud humana, tomando en consideración un caso de exposición genérico. Dichos valores se presentan en la Tabla 3-7, que para el caso del VI dependen del tipo de uso del suelo (agrícola y residencial).

### 3.5.3 Normativa Canadiense

La normativa de suelos de Canadá se encuentra establecida por la Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health (CCME, 1999), la cual proporciona los valores de concentraciones para escenarios de uso de suelo agrícola y residencial, los cuales se presentan en la Tabla 3-8.

Tabla 3-7 Criterios establecidos para la calidad de suelos, Estado de Sao Paulo, Brasil. Modificado de Aliaga (2016).

Elemento	VP	VI (Uso Agrícola) VI(Usos Residencial)	
		[ppm]	
<b>As</b>	15	35	55
<b>Co</b>	25	35	65
<b>Cr<sup>total</sup></b>	75	150	300
<b>Cu</b>	60	200	400
<b>Mo</b>	30	50	100
<b>Ni</b>	30	70	100
<b>Pb</b>	72	180	300
<b>Sb</b>	-	-	-
<b>V</b>	-	-	-
<b>Zn</b>	300	450	1000

Tabla 3-8 Criterios establecidos para la calidad de suelos según la normativa canadiense. Modificado de Aliaga (2016).

Elemento	Uso Agrícola	Uso Residencial
	[ppm]	
<b>As</b>	12	12
<b>Co</b>	35	50
<b>Cr<sup>total</sup></b>	64	64
<b>Cu</b>	63	63
<b>Mo</b>	15	15
<b>Ni</b>	50	50
<b>Pb</b>	70	140
<b>Sb</b>	20	20
<b>V</b>	130	130
<b>Zn</b>	200	200

### 3.5.4 Normativa Holandesa

La normativa de suelos del Reino de los Países Bajos (Dutch Target and Intervention Values for Soil Remediation (VROM, 2000)), establecida por el Instituto Nacional de Salud Pública y Protección Medioambiental (RIMV). Dicha normativa considera dos parámetros, el primero consiste en el Valor Objetivo, la cual considera los niveles de concentración en los cuales existe una calidad de suelo sostenible. El segundo corresponde al Valor de Intervención, indica los niveles de concentración sobre el cual las propiedades funcionales del suelo para plantas y animales se encontrarían seriamente deterioradas. Dichos valores se despliegan en la Tabla 3-9.

Tabla 3-9 Criterios establecidos para la calidad de suelos según la normativa holandesa. Modificado de Aliaga (2016).

Elemento	Valor Objetivo	Valor de Intervención
		[ppm]
<b>As</b>	29	55
<b>Co</b>	9	240
<b>Cr</b>	100	380
<b>Cu</b>	36	190
<b>Mo</b>	3	200
<b>Ni</b>	35	210
<b>Pb</b>	85	530
<b>Sb</b>	3	15
<b>V</b>	42	250
<b>Zn</b>	140	720

## 4. Resultados

### 4.1 Estadística univariable

#### 4.1.1 Elementos mayores

##### 4.1.1.1 Concentraciones elementales

En la Tabla 4-1 se presentan el resumen estadístico de las concentraciones elementales para los elementos mayores. Hacer notar que las concentraciones para dichos elementos se encuentran cuantificados según su concentración de porcentaje en peso (wt%).

Tabla 4-1 Resumen estadístico de concentraciones elementales de elementos mayores (wt%). Resultados obtenidos mediante la utilización del software IO-GAS.

Elemento	Unidad	N	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo	%CVR
Fe	wt %	43	3.68	4.96	5.67	6.94	16.20	25.89
Ca	wt %	43	1.27	1.62	1.89	2.14	2.92	20.40
P	wt %	43	0.02	0.03	0.04	0.05	0.22	36.16
Mg	wt %	43	0.37	0.47	0.60	0.82	1.86	43.24
Ti	wt %	43	0.62	0.80	0.93	1.12	2.20	25.51
Al	wt %	43	5.73	6.81	7.05	7.26	8.41	4.73
Na	wt %	43	1.20	1.76	1.94	2.10	2.46	12.50
K	wt %	43	0.44	0.73	0.87	0.99	1.22	22.15

##### 4.1.1.2 Distribución espacial

La distribución espacial de los elementos mayores se exhibe en el Anexo IV, los mapas de distribución para los elementos mayores y trazas fueron obtenidos mediante el empleo de diagramas compuestos, que involucra el empleo de histogramas, *box plots* y *raster* de interpolación. El *raster* de interpolación fue creado mediante la herramienta *Spline* presente en el software ArcGis 10 (ESRI) (Ver 3.4.2.4).

Se desprende que ciertos elementos presentan una distribución similar en el área de estudio, las cuales se precisan a continuación.

El hierro(Fe) y titanio(Ti) presentan una alta concentración en el margen oriental-suroriental de la zona de estudio, coincidiendo con la distribución de la unidad San Antonio, específicamente, a la sub-unidad Ortogneis definida por Contreras (2015) (Figura 2-9), correspondiente a rocas metamórficas, definidas como ortogneis de biotita y ortogneis de biotita-cuarzo. Presentan texturas bandeadas, con franjas de minerales máficos (biotita y hornblenda), y de minerales félsicos (cuarzo, plagioclasa). Además, presenta muscovita primaria, junto con epidota y zircón como minerales accesorios. Presenta una alteración moderada a sericita y moderada a intensa a arcillas.

Por su parte, el calcio (Ca) y magnesio (Mg) presentan una alta concentración en el margen occidental-noroccidental de la zona de estudio, coincidiendo con la distribución de las unidades Secuencia Malvilla y Depósitos fluviales definidas por Contreras (2015) (Figura 2-9). La Secuencia Malvilla corresponde a una secuencia sedimentaria marina-fosilífera medianamente consolidada, compuesta por areniscas de grano muy fino a muy grueso, bancos de conglomerados y coquinas. Se correlaciona con la formación Navidad (Gana et al., 1996).

Finalmente, el fósforo(P) y potasio(K) presentan una alta concentración en la zona central del área de estudio, la cual coincide con el emplazamiento de suelos destinados a la plantación de vid, destacar que dichos suelos no corresponde a suelos desarrollados in situ, es decir, el material de aquella zona no posee un origen litogénico o pedogénico, por el contrario, el material corresponde a un suelo trabajado proveniente de una fuente externa, por lo tanto, posee una contribución antropogénica de alto impacto (Ver 2.6).

#### 4.1.2 Elementos trazas

##### 4.1.2.1 Concentraciones elementales

A continuación, en la Tabla 4-2 se exhibe el resumen estadístico de las concentraciones elementales para los elementos trazas, recalcar que su concentración se encuentra cuantificada en ppm, exceptuando el caso del elemento plata, la cual se encuentra cuantificada en ppb.

Tabla 4-2 Resumen estadístico de concentraciones elementales de elementos traza (ppm), exceptuando la concentración de plata (ppb). Resultados obtenidos mediante la utilización del software IO-GAS.

Elemento	Unidad	N	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo	%CVR
Mn	ppm	43	847	1122	1372	1651	2873	28.56
Mo	ppm	43	0.41	0.65	0.78	0.94	1.68	27.56
Cu	ppm	43	26.60	34.60	39.10	43.30	63.70	16.49
Pb	ppm	43	11.73	13.46	14.45	15.35	18.51	9.67
Zn	ppm	43	50.30	67.70	75.90	103.7	267.7	35.16
Ag	ppb	43	10	36	48	63	86	41.70
Ni	ppm	43	13.20	19.30	24.20	30.20	95.40	33.39
Co	ppm	43	12.70	16.90	20.50	23.50	44.80	23.87
As	ppm	43	4.80	6.90	8.30	10.30	14.20	30.37
U	ppm	43	1	1.20	1.40	1.50	3.40	15.86
Th	ppm	43	4.30	5.80	6.20	7.20	14.50	16.74
Sr	ppm	43	226	278	304	323	372	10.97
Sb	ppm	43	0.40	0.73	0.93	1.08	1.20	27.90
Bi	ppm	43	0.08	0.10	0.13	0.14	0.22	22.81
V	ppm	43	124	166	187	221	698	21.80
La	ppm	43	19.8	24.70	27.20	31	34.40	17.17
Cr	ppm	43	36	65	76	100	178	34.14
Ba	ppm	43	277	337	369	436	729	19.89
W	ppm	43	0.40	0.60	0.70	0.90	1.20	31.77
Zr	ppm	43	34.50	55.60	71.90	82	95.20	27.22
Sn	ppm	43	1.30	1.60	1.70	2	3	17.44
Sc	ppm	43	12.20	15.30	17.60	19.80	29.80	18.95
Y	ppm	43	18.60	23.60	25.10	29.20	36.50	16.54
Ce	ppm	43	41.49	51.85	55.72	60.13	69.34	11.02
Pr	ppm	43	5.20	6.30	7.40	8.10	9.60	18.03
Nd	ppm	43	21.30	27.30	29.1	31.90	37.20	11.72
Sm	ppm	43	4.30	5.50	6.20	6.60	7.90	13.15

Continuación Tabla 4-2

Elemento	Unidad	N	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo	%CVR
Eu	ppm	43	1.30	1.50	1.70	1.80	2.20	13.08
Gd	ppm	43	3.40	5.10	5.50	6.20	7.80	14.83
Tb	ppm	43	0.50	0.70	0.80	0.90	1.10	18.53
Dy	ppm	43	3.50	4.20	4.60	5	5.80	12.89
Ho	ppm	43	0.70	0.80	0.90	1.10	1.30	24.71
Er	ppm	43	1.80	2.30	2.60	2.90	3.60	17.11
Tm	ppm	43	0.30	0.30	0.40	0.40	0.50	18.53
Yb	ppm	43	1.70	2.20	2.30	2.50	3.30	9.67
Hf	ppm	43	1.23	1.71	2.05	2.41	2.78	25.31
Li	ppm	43	9.90	12.40	13.6	15.40	21.30	16.35
Rb	ppm	43	24.90	37	42.30	48.40	60.90	19.98
Ta	ppm	43	0.40	0.50	0.60	0.70	0.90	24.71
Nb	ppm	43	6.45	7.61	9.33	10.52	14.87	23.12
Cs	ppm	43	1.50	1.80	2	2.20	2.90	14.83
Ga	ppm	43	14.57	16	16.85	18.62	23.40	11.53
In	ppm	43	0.04	0.06	0.07	0.08	0.15	21.18
Tl	ppm	43	0.19	0.23	0.27	0.30	0.50	19.22

#### 4.1.2.2 Distribución espacial

En el Anexo IV se presentan la distribución espacial de los elementos trazas, estos fueron obtenidos mediante el empleo de diagramas compuestos, que involucra el empleo de histogramas, *box plots* y *raster* de interpolación. El *raster* de interpolación fue creado mediante la herramienta *Spline* presente en el software ArcGis 10 (ESRI) (Ver 3.4.2.4).

De manera análoga a lo realizado con anterioridad, se observa que ciertos elementos presentan una distribución similar en el área de estudio. En particular, el manganeso(Mn), molibdeno(Mo), zinc(Zn), cobalto(Co), vanadio(V), cromo(Cr), estaño(Sn), escandio(Sc), hafnio(Hf), tantalio(Ta) y niobio(Nb) presentan una alta concentración en el margen orientalesuroriental de la zona de estudio, coincidiendo con la distribución de la unidad San Antonio, específicamente, a la sub-unidad Ortogneis definida por Contreras (2015) (Figura 2-9).

### 4.1.3 Factor de enriquecimiento

A continuación, se muestra el Factor de Enriquecimiento para la totalidad de elementos muestreados, (Figura 4-1). Como se mencionó con anterioridad, se utilizó la compilación de Taylor & McLennan (2009) como referencia y el elemento zirconio (Zr) como elemento respectivo de referencia.

En consideración con los resultados obtenidos con anterioridad, en la Tabla 4-3, se presenta la categorización de la totalidad de elementos con respecto al origen de la fuente principal de emisión para cada elemento, ya sea natural o antropogénica.

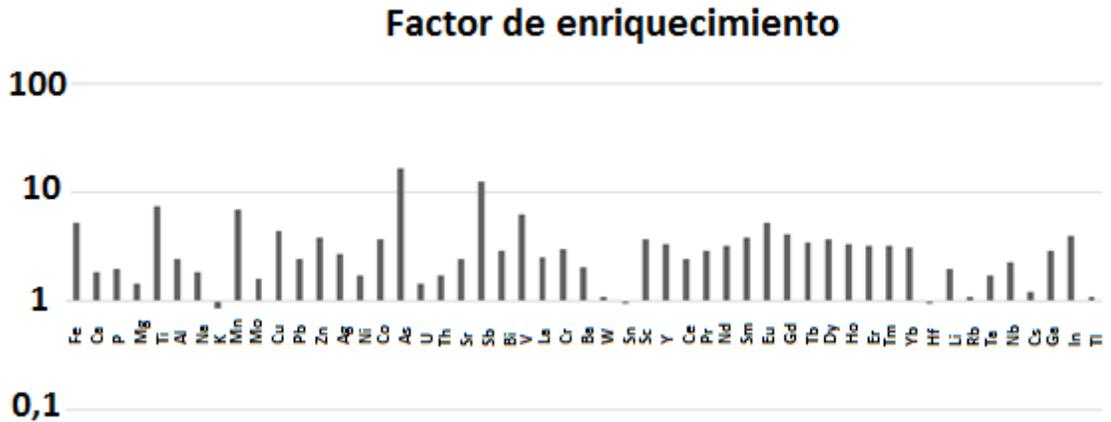


Figura 4-1 Factor de enriquecimiento

Tabla 4-3 Categorización de elementos según fuente de origen.

Rango	Origen	Elementos
<b>FE&lt;1</b>	Natural, litogénico	K, Sn, Hf
<b>1&lt;FE&lt;10</b>	Natural y antrópica	Fe, Ca, P, Mg, Ti, Al, Na, Mn, Mo, Cu, Pb, Zn, Ag, Ni, Co, U, Th, Sr, Bi, V, La, Cr, Ba, W, Sc, Y, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Li, Rb, Ta, Nb, Cs, Ga, In, Tl.
<b>FE&gt;10</b>	Importante contribución antropogénica	As, Sb

## 4.4 Estadística multivariable

### 4.4.1 Análisis de correlación múltiple

A continuación, se presenta el análisis de correlación múltiple obtenido para la totalidad de elementos. (Tabla 4-4)

Para la totalidad de elementos muestreados se presentan una totalidad de 109 pares que exhiben una fuerte correlación positiva ( $>0,75$ ), entre las que destacan las asociaciones geoquímicas: Fe-Ti-Mn-Mo-Zn-Co-V-Sn; As-Sb-Zr y REE. Por su parte, se presentan una totalidad de 147 pares que exhiben una correlación positiva ( $>0,5$  y  $<0,75$ ), entre que destacan las asociaciones geoquímicas conformadas por: Ba-Li-Cs; Pb-Sb-Hf; Cr-Sc-In y V-Ga-In. Finalmente, se presentan una totalidad de 82 pares que exhiben una correlación negativa ( $<-0,5$ ).

### 4.4.2 Análisis multivariable

#### 4.4.2.1 Análisis de componentes principales

En la Tabla 4-5 se presenta los resultados obtenidos para el análisis de componente principales, el cual se compone de un total de 52 componentes principales correspondientes al total de variables muestreadas, dichos resultados se obtuvieron mediante la utilización del *software* IO-GAS. Por consiguiente, se definió un total de 6 componentes principales debido que explican por sobre el 80% la variabilidad de la totalidad de los datos. Esto último fija los factores que se emplearan en el desarrollo del Análisis Factorial.

Tabla 4-4 Análisis de correlación múltiple. Resultados obtenidos mediante la utilización del software IO-GAS.

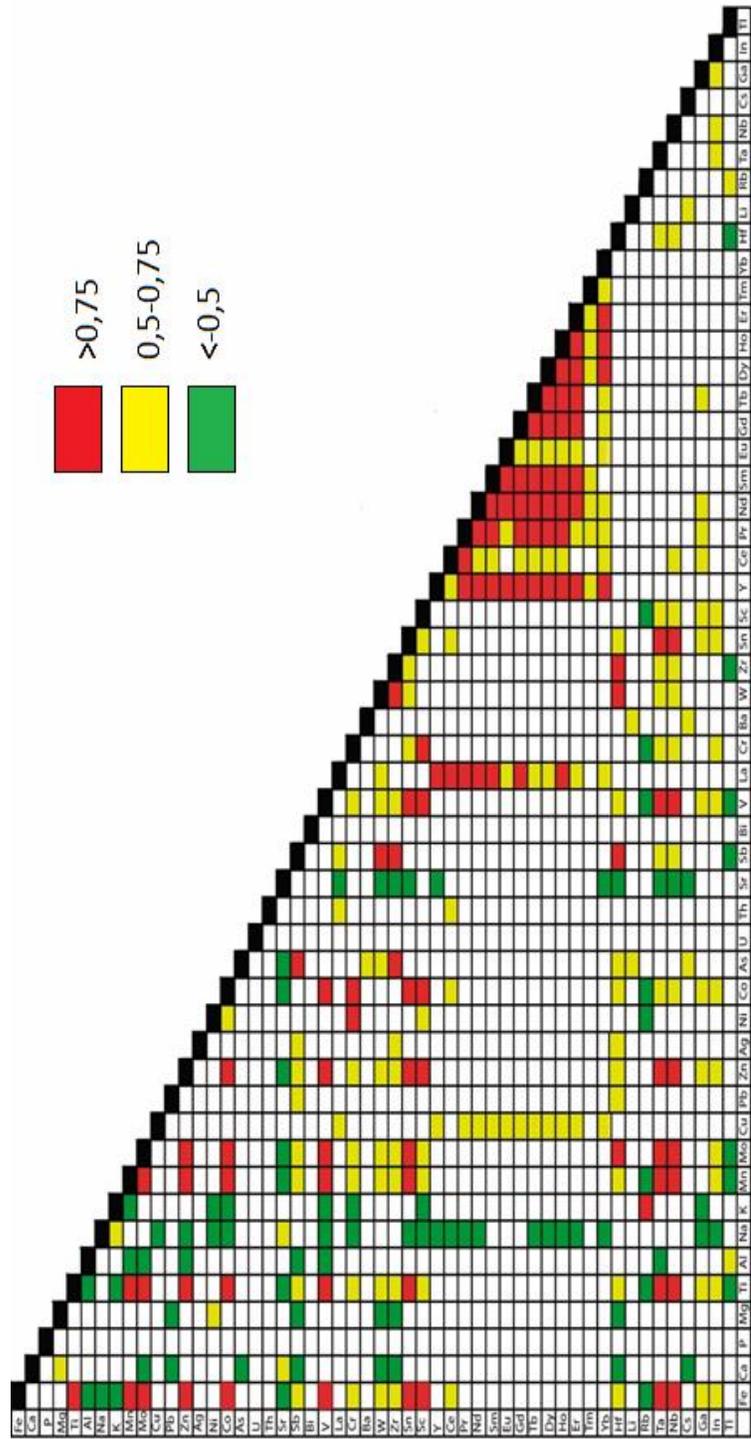


Tabla 4-5 Resumen análisis de componentes principales. Resultados obtenidos mediante la utilización del software IO-GAS.

Componente principal	Eigenvalor	Porcentaje (%)	Porcentaje acumulado (%)
PC1	19,6	37,68	37,68
PC2	8,846	17,01	54,7
PC3	7,422	14,27	68,97
PC4	2,616	5,03	74
PC5	1,917	3,687	77,69
PC6	1,719	3,305	80,99
PC7	1,443	2,775	83,77
PC8	1,168	2,245	86,01
PC9	1,018	1,959	87,97
PC10	0,8461	1,627	89,6

#### 4.4.2.2 Análisis factorial

A continuación, en la Figura 4-2 se observa los resultados obtenidos para el análisis factorial. De este se desprende que los primeros 6 factores explican aproximadamente el 80% de la variabilidad total de la base de datos, de manera análoga a los resultados obtenidos para el análisis de componentes principales (Tabla 4-5). Dichos resultados se obtuvieron mediante el empleo del *software* XLSTAT, mediante el método de variación rotada máxima.

En la Tabla 4-6 se presentan la correlación entre las variables y los factores asociados. De acuerdo a esto se definieron las 6 asociaciones geoquímicas. Destacar que valores de factor de cargas mayores a 0,5 o menores a -0,5 serán considerados como señales principales. Por otra parte, valores de factor de carga entre 0,35 y 0,5, como también, entre -0,5 y -0,35 serán considerados como señales menores o secundarias, las cuales se presentarán entre paréntesis ( ).

## Análisis factorial

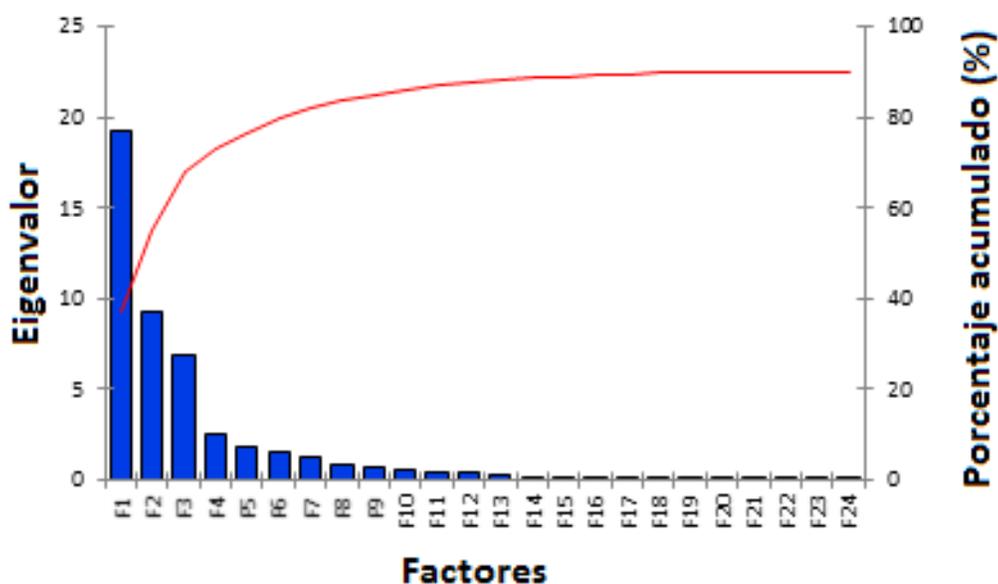


Figura 4-2 Resultados Análisis Factorial. Resultados obtenidos mediante el empleo del software XLSTAT, mediante el método de variación rotada máxima.

**Factor 1:** Fe, Ti, Mn, Mo, Cu, Zn, Co, Th, Sb, V, La, Cr, W, Zr, Sn, Sc, Hf, Ta, Nb, Ga, In, REE, (Pb), (Ag), (Ni), (As), (U), (Bi), (Cs); -Na, -Sr, -K, (-Ca), (-Rb)

El factor 1 representa el 37,04% de la variabilidad total de datos. Se compone de una señal principal que incluye los elementos Fe, Ti, Mn, Mo, Cu, Zn, Co, Th, Sb, V, La, Cr, W, Zr, Sn, Sc, Hf, Ta, Nb, Ga, In, REE, además de una señal secundaria de (Pb), (Ag), (Ni), (As), (U), (Bi) y (Cs). Por otra parte, se compone de una señal principal inversa de Na, K, Sr, además de una señal secundaria inversa de (Ca) y (Rb).

**Factor 2:** Ti, Mn, V, (Fe), (Mo), (Zn), (Co), (Cr), (Sn), (Ta), (Nb), (Sb), (Hf); -Al, -Li, -Tl, -REE, (-Cu), (-Ba), (-Rb), (-Cs), (-La)

El factor 2 representa el 17,8% de variabilidad total de la base de datos, y junto con el factor 1 representa un 54,81% de la variabilidad acumulada total de la base de datos. Se compone de una señal principal que incluye los elementos Ti, Mn y V, además de una señal secundaria de (Fe),

Tabla 4-6 Correlación entre variables geoquímicas y factores asociados. En rojo se muestran aquellos elementos que representan una señal principal y secundaria, en cambio, en verde, corresponden a aquellos elementos que representan una señal principal y secundaria inversas. Resultados obtenidos mediante el empleo del software XLSTAT, mediante el método de variación rotada máxima.

Elemento	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Fe	0,858	0,457	0,121	0,071	0,028	0,017
Ca	-0,456	-0,052	0,777	-0,174	0,005	-0,004
P	0,016	-0,071	-0,144	-0,045	-0,079	-0,829
Mg	-0,019	-0,234	0,855	-0,072	0,288	-0,220
Ti	0,815	0,535	0,030	0,049	-0,109	0,036
Al	-0,298	-0,645	0,068	0,325	0,247	0,030
Na	-0,713	0,170	-0,349	-0,113	-0,410	-0,018
K	-0,537	-0,127	-0,601	0,087	-0,193	-0,406
Mn	0,767	0,527	0,029	-0,071	0,040	0,120
Mo	0,794	0,488	-0,156	0,074	-0,108	-0,149
Cu	0,562	-0,417	-0,020	-0,268	0,242	-0,443
Pb	0,340	0,131	-0,464	0,236	-0,030	0,131
Zn	0,813	0,463	0,099	0,072	0,015	-0,135
Ag	0,424	0,182	-0,221	-0,147	0,169	-0,236
Ni	0,369	0,032	0,691	-0,380	0,221	-0,263
Co	0,798	0,424	0,269	-0,043	0,150	-0,022
As	0,468	-0,043	-0,650	-0,221	0,278	-0,082
U	0,360	0,080	-0,260	0,168	-0,063	-0,006
Th	0,525	-0,059	0,044	0,314	-0,192	-0,092
Sr	-0,735	0,027	0,251	-0,048	-0,394	0,051
Sb	0,559	0,312	-0,667	-0,235	-0,026	-0,063
Bi	0,484	-0,157	-0,183	0,108	-0,056	-0,019
V	0,826	0,527	0,085	0,055	-0,007	0,030

Continuación Tabla 4-6

Elemento	F1	F2	F3	F4	F5	F6
La	0,712	-0,486	-0,105	0,170	-0,278	-0,160
Cr	0,607	0,410	0,512	-0,271	0,052	-0,198
Ba	0,049	-0,484	-0,589	-0,227	0,262	0,067
W	0,685	0,224	-0,505	-0,041	-0,119	0,044
Zr	0,592	0,281	-0,649	-0,229	0,062	-0,021
Sn	0,796	0,385	0,017	0,299	0,050	0,048
Sc	0,689	0,227	0,608	-0,004	0,024	-0,011
Y	0,677	-0,620	-0,049	-0,285	-0,065	0,063
Ce	0,717	-0,254	0,125	0,342	-0,097	-0,102
Pr	0,682	-0,598	0,064	0,222	-0,205	-0,047
Nd	0,681	-0,648	0,104	0,028	-0,206	-0,035
Sm	0,646	-0,595	0,080	-0,148	-0,218	-0,022
Eu	0,472	-0,626	-0,064	-0,185	-0,263	0,110
Gd	0,656	-0,560	0,061	-0,098	-0,216	-0,005
Tb	0,668	-0,564	0,233	0,033	-0,105	0,065
Dy	0,617	-0,623	0,111	-0,132	-0,116	0,122
Ho	0,701	-0,567	0,094	-0,115	-0,100	0,032
Er	0,660	-0,560	0,114	-0,283	0,052	0,169
Tm	0,408	-0,434	0,010	-0,123	-0,002	0,222
Yb	0,693	-0,484	0,098	-0,191	0,013	0,049
Hf	0,651	0,344	-0,582	-0,178	0,008	0,021
Li	0,292	-0,542	-0,436	0,134	0,371	0,049
Rb	-0,421	-0,358	-0,430	0,325	-0,053	-0,333
Ta	0,773	0,436	-0,024	0,141	-0,106	0,043

Continuación Tabla 4-6

Elemento	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Nb	0,774	0,406	0,024	0,222	-0,120	0,038
Cs	0,345	-0,380	-0,569	0,184	0,484	0,177
Ga	0,658	-0,088	0,352	0,486	0,249	-0,010
In	0,599	0,247	0,311	0,368	0,009	-0,019
Tl	-0,249	-0,628	0,075	0,598	0,156	-0,110

(Mo), (Zn), (Co), (Cr), (Sn), (Ta), (Nb), (Sb) y (Hf). Por otra parte, se compone de una señal principal inversa de Al, Li y Tl, REE, además de una señal secundaria inversa de (Cu), (Ba), (Rb), (Cs), (La).

**Factor 3:** Ca, Mg, Ni, Cr, Sc, (Ga), (In); -K, -As, -Sb, -Ba, -W, -Zr, -Hf, -Cs, (-Pb), (-Li), (-Rb), (-Na)

El factor 3 representa el 13,25% de la variabilidad total de la base de datos, y junto con los factores 1 y 2 representa un 68,09% de la variabilidad acumulada total de la base de datos. Se compone de una señal principal que incluye los elementos Ca, Mg, Ni, Cr y Sc, además de una señal secundaria de (Ga) e (In). Por otra parte, se compone de una señal principal inversa de K, As, Sb, Ba, Ba, W, Zr, Hf y Cs, además de una señal secundaria inversa de (Pb), (Li), (Rb) y (Na).

**Factor 4:** Tl, (Ga), (In), (Rb), (Ce), (Th), (Al); (-Ni)

El factor 4 representa el 4,84 de la variabilidad total de la base de datos, y junto con los factores 1,2 y 3 representa un 72,93% de la variabilidad acumulada total de la base de datos. Se compone de una señal principal que incluye al elemento Tl, además de una señal secundaria de (Ga), (In), (Rb), (Ce), (Th), (Al). Por otra parte, se compone de una señal secundaria inversa de (Ni).

**Factor 5:** (Li), (Cs); (-Na), (-Sr)

El factor 5 representa el 3,59% de la variabilidad total de la base de datos, y junto con los factores 1, 2, 3 y 4 representa un 76,51% de la variabilidad acumulada total de la base de datos. Se compone de una señal secundaria que incluye los elementos (Li) y (Cs). Por otro lado, se compone de una señal secundaria inversa de (Na) y (Sr).

**Factor 6:** -P, (-K), (-Cu), (-Rb)

El factor 6 representa el 3,11% de la variabilidad total de la base de datos, y junto con los factores 1, 2, 3, 4 y 5 representan un 79,62% de la variabilidad total de la base de datos. Se compone de una señal principal inversa que incluye al elemento -P, además de una señal secundaria de inversa de (K), (Cu) y (Rb).

## 5 Discusiones

En este apartado se analizan y discuten los principales resultados obtenidos anteriormente. En primer lugar, las discusiones se enfocan en el análisis de la estadística univariable de la base de datos, la cual contempla los siguientes tópicos: concentraciones elementales, distribución espacial y factor de enriquecimiento. En segundo lugar, se exponen las principales asociaciones geoquímicas observadas mediante la utilización de las herramientas: análisis de correlación múltiple, análisis de componente principales y análisis factorial. En tercer lugar, además de final, se realiza una comparación entre el fondo geoquímico de la zona con respecto a los elementos trazas que representen el mayor peligro para la calidad de los suelos y el medio ambiente.

### 5.1 Estadística univariable

Primeramente, es de vital importancia aclarar, que si bien, los resultados se presentan con respecto a la definición geoquímica de elementos mayores y elementos traza, en el presente apartado se analizan y discuten principalmente aquellos elementos que tienen una real importancia para el crecimiento y desarrollo de las plantas (macroelementos, microelementos), como también, aquellos elementos que representen un peligro de toxicidad en suelos, plantas y el medio ambiente (Tabla 5-1).

Tabla 5-1 Macronutrientes, micronutrientes y elementos tóxicos.

Macronutrientes	P, Mg, Ca, K
Micronutrientes	Fe, Mn, Cu, Zn, Ni, Mo
Elementos tóxicos	As, Cr, Co, Mn, Pb, Sb, Zn, Cu, Ni, V

#### 5.1.2 Concentraciones elementales y distribución espacial

Para el análisis de la totalidad de elementos químicos se hizo uso de los siguientes estadígrafos: mínimo, mediana (Q2, segundo cuartil), máximo, Q1 (primer cuartil), Q3 (tercer cuartil) y coeficiente robusto de variación (CVR). Los resultados son expuestos en Tabla 4-1 y Tabla 4-2 para la concentración de elementos mayores y trazas, respectivamente. La herramienta *box-plot* facilita la visualización de la caracterización de las concentraciones que muestran los estadígrafos nombrados anteriormente (Ver Anexo IV).

La línea base establece el fondo geoquímico al rango definido por el rango intercuartílico, que corresponde a los valores que se encuentran distribuidos en el intervalo [Q1, Q3], que equivale

al 50% de las concentraciones de la distribución de algún elemento en particular en la zona de estudio. Sin embargo, la línea base, obtenida mediante el desarrollo y análisis de las concentraciones elementales y de la distribución espacial de los elementos químicos, no explica la compleja interrelación entre los elementos químicos. Por lo tanto, para esclarecer el punto anterior se hace empleo de herramientas de estadística multivariable, resultados que se analizan con posterioridad.

### 5.1.2.1 Elementos mayores

A continuación, se analiza la concentración elemental y distribución espacial para los elementos mayores: hierro (Fe), calcio (Ca), magnesio (Mg), fósforo (P), aluminio (Al), potasio (K) definidos en la Tabla 5-1.

#### **Hierro (Fe)**

Las concentraciones medias varían entre 4,96-6,94 wt%, alcanzando un máximo de 16,20 wt%. La mediana presenta un valor de 5,67 wt%. En lo que respecta a su distribución espacial, presenta una alta concentración en el margen oriental-suroriental de la zona de estudio, coincidiendo con la distribución de la unidad San Antonio, específicamente, a la sub-unidad Ortogneis definida por Contreras (2015) (Figura 5-1). Dicha subunidad presenta minerales máficos como biotita y hornblenda, por lo tanto, su meteorización proveería de hierro a los suelos suprayacentes.

El hierro corresponde a un microelemento esencial para el desarrollo de las plantas, ya que es constituyente de metaloenzimas, además, participa en la fotosíntesis, en la fijación simbiótica de nitrógeno y en su metabolismo, y finalmente, en reacciones redox (Alloway, 2008).

Síntomas de deficiencias en el suministro de hierro corresponde a la clorosis intervenal de las hojas jóvenes (Alloway, 2008). Además, de una ralentización del crecimiento (Christensen et al., 2001). Para el caso particular de la uva, esta presenta una alta susceptibilidad a la deficiencia de hierro (Alloway, 2008).

Síntomas de exceso de niveles de hierro produce un lento crecimiento de hojas, tallos y raíces de las plantas. La uva presenta una alta susceptibilidad a niveles tóxicos de hierro (Kabata-Pendías, 2001).

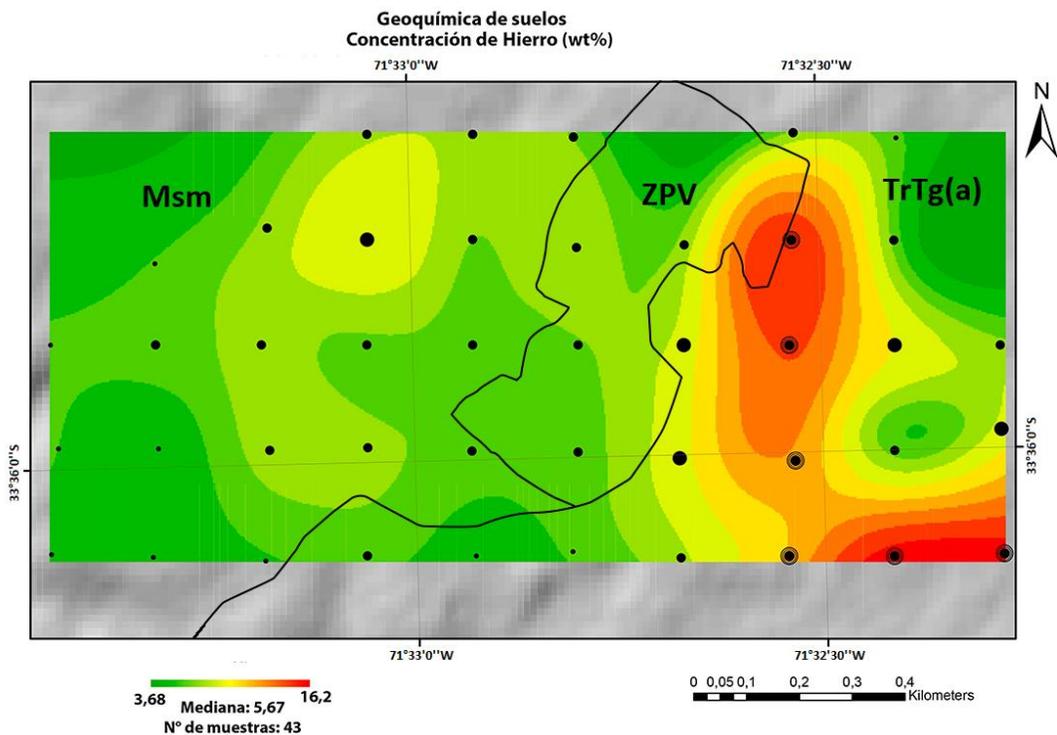


Figura 5-1 Distribución espacial del elemento hierro. Msm: Secuencia sedimentaria Malvilla; ZPV: Zona de plantación de viñedos; TrTg(a) Sub-unidad Ortogneis, definidas por Contreras (2015).

## Calcio (Ca)

Las concentraciones medias varían entre 1,62–2,14 wt%, alcanzando un máximo de 2,92 wt%. La mediana presenta un valor de 1,89 wt%. En lo que respecta a su distribución espacial, presenta una alta concentración en el margen occidental-noroccidental de la zona de estudio, coincidiendo con la distribución de las unidades Secuencia Malvilla y Depósitos fluviales definidas por Contreras (2015) (Figura 5-2). Reimann & de Caritat (1998) establecen que los elementos Ca-Mg-Sr tienen tendencia a sustituirse en la estructura de minerales carbonatados como calcita y dolomita. Por lo tanto, la meteorización de dichos minerales pertenecientes a la Secuencia Malvilla suministraría a los suelos de dichos elementos.

Contreras (2015) reporta hasta un 41% de CaO para niveles de coquinas, mostrando una diferencia significativa con la concentración máxima presentes en los suelos del presente estudio, lo anterior se explicaría debido a la diferencia de altura entre la zona de plantación y el nivel base local (Figura 5-3), lo que provocaría una amplia variación del nivel freático, favoreciendo a un mayor escape de cationes y agua hacia cursos de agua aledaños (Lagos, 2015).



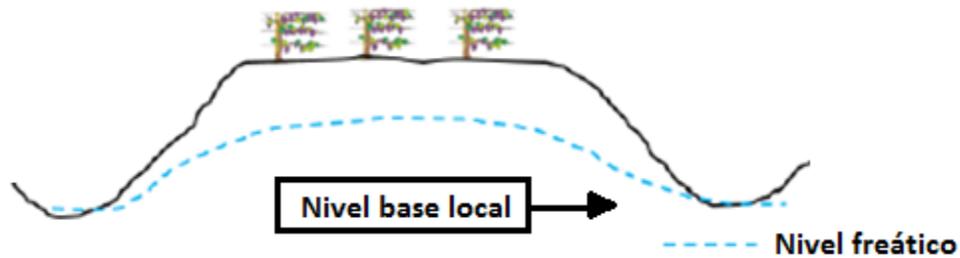


Figura 5-3 Superficie colgada (desequilibrio) respecto al nivel base local, lo que genera un nivel freático más profundo y curvo (Hubbert, 1940). Modificado de Lagos (2015).

## Fósforo (P)

Las concentraciones medias varían entre 0,03-0,05 wt%, alcanzando un máximo de 0,22 wt%. La mediana presenta un valor de 0,04 wt%. En lo que respecta a su distribución espacial, presenta una alta concentración en la zona central del área de estudio, la cual coincide con el emplazamiento de suelos destinados a la plantación de vid (Ver Figura 5-15), destacar que dichos suelos presentan una alta removilización de material, por lo cual, no corresponde a suelos desarrollados in-situ (Ver 2.6).

El fósforo corresponde a un macroelemento esencial para el desarrollo de las plantas, el cual constituye las estructuras macromoleculares de proteínas y ácidos nucleicos, (Marschner, 1995). Además de formar las moléculas mencionadas anteriormente, forma parte de fosfolípidos, de las coenzimas NAD y NADP, y del ATP, el cual tiene como función el transporte de energía dentro de la planta (Christensen et al., 2001).

La deficiencia de fósforo en la vid perjudica el correcto crecimiento del sistema radicular y del crecimiento total de la planta, como también la presencia de hojas amarillentas y frutos pequeños. En casos de deficiencia extrema sus hojas se tornan rojizas (Christensen et al., 2001).

## Magnesio (Mg)

Las concentraciones medias varían entre 0,47-0,82 wt%, alcanzando un máximo de 1,86 wt%. La mediana presenta un valor de 0,6 wt%. En lo que respecta a su distribución espacial, presenta una alta concentración en el margen occidental-noroccidental de la zona de estudio, coincidiendo con la distribución de las unidades Secuencia Malvilla y Depósitos fluviales definidas por Contreras (2015) (Figura 5-4). Reimann & de Caritat (1998) establecen que los elementos Ca-Mg-Sr tienen tendencia a sustituirse en la estructura de minerales carbonatados como calcita y

dolomita. Por lo tanto, la meteorización de dichos minerales pertenecientes a la Secuencia Malvilla suministraría a los suelos de dichos elementos.

El magnesio corresponde a un elemento estructural de la clorofila, por lo cual tiene un rol fundamental en la fotosíntesis, facilita la síntesis de azúcares contribuyendo en su traslado y optimiza el aprovechamiento del fósforo facilitando el desdoblamiento del ATP (Gaspar). Además, participa en la regulación del pH celular y del balance catión-anión. (Marschner, 1995).

Síntomas de deficiencia de magnesio se reflejan en la progresiva modificación del color hacia un tono de color amarillo a medida que avanza el ciclo de la planta (Christensen et al., 2001).

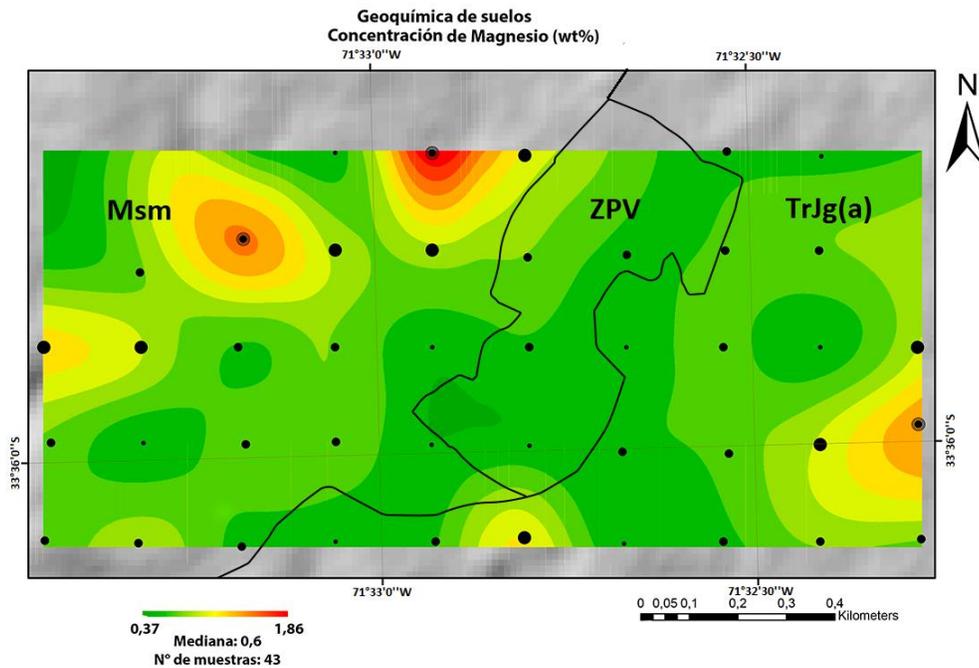


Figura 5-4 Distribución espacial del elemento magnesio. Msm: Secuencia sedimentaria Malvilla; ZPV: Zona de plantación de viñedos; TrTg(a) Sub-unidad Ortogneis, definidas por Contreras (2015).

## Aluminio (Al)

Las concentraciones medias varían entre 6,81-7,26 wt%, alcanzando un máximo de 8,41 wt%. La mediana presenta un valor de 7,05 wt%. En lo que respecta a su distribución espacial no presentan un patrón en su distribución en la zona de estudio.

Según Marschner (1995) no existe evidencia de que el aluminio sea un elemento esencial para las plantas, no obstante, Kabata-Pendías (2001) manifiesta que es un controlador físico de las

propiedades del plasma y de la permeabilidad de la membrana celular, además de participar en la activación de ciertas enzimas.

Foy et al (1978) menciona que la toxicidad de aluminio se relaciona principalmente a la absorción y transporte de nutrientes deteriorados y a una proporción desequilibrada de cationes a aniones. Kabata-Pendías (2001) manifiesta que niveles tóxicos provocarían el retraso del crecimiento general de las plantas y daños al sistema radicular.

## **Potasio (K)**

Las concentraciones medias varían entre 0,73-0,99 wt%, alcanzando un máximo de 1,22 wt%. La mediana presenta un valor de 0,87 wt%. En lo que respecta a su distribución espacial, presenta una alta concentración en la zona central del área de estudio, la cual coincide con el emplazamiento de suelos destinados a la plantación de vid (Ver Figura 5.15). Destacar que dichos suelos presentan una alta removilización de material, por lo cual, no corresponde a suelos desarrollados in-situ (Ver 2.6)

El potasio corresponde a un macroelemento. Marschner (1995) establece que entre las funciones principales del potasio se encuentra la osmorregulación, mantenimiento del equilibrio en las células y compartimientos, además, de la regulación de actividades enzimáticas. En lo que respecta a la vid (Gaspar) establece que el rol más importante es el traslado de azúcares fotosintetizados.

Larcher y Nicolini (2008) muestran que el potasio en la uva se encuentra en concentraciones superiores a 1 ppm. Deficiencias severas en su suministro reducen apreciablemente el crecimiento de la planta de uva (Christensen et al., 2001).

### 5.1.2.2 Elementos traza

A continuación, se analiza la concentración elemental y distribución espacial para los elementos traza: manganeso (Mn), molibdeno (Mn), cobre (Cu), plomo (Pb), zinc (Zn), níquel (Ni), cobalto (Co), arsénico (As), antimonio (Sb), vanadio (V) y cromo (Cr).

## **Manganeso (Mn)**

Las concentraciones medias varían entre 1122-1651 ppm, alcanzando un máximo de 2873 ppm. La mediana presenta un valor de 1372 ppm. El manganeso corresponde a uno de los elementos traza más abundante en la litosfera. Su origen litogénico se encuentra asociado principalmente a material heredado desde rocas máficas (Kabata-Pendías, 2001).

El manganeso corresponde a un micronutriente esencial. Participa en la fotólisis del agua en los cloroplastos, en la regulación de actividad enzimática y en la protección contra la oxidación de las membranas (Alloway, 2008). Kabata-Pendías (2001) afirma que la función primordial del manganeso es en la participación de procesos de óxido-reducción.

Deficiencias en su suministro provoca manchas cloróticas y necrosis de hojas jóvenes, además de disminución en la turgencia de estas. Para el caso particular de la uva, esta muestra una sensibilidad alta a la deficiencia de manganeso (Alloway, 2008).

La toxicidad produce clorosis y lesiones necróticas en hojas antiguas, manchas necróticas de color marrón, acumulación de  $MnO_2$  en células epidérmicas, puntas secas de hojas, e interrupción en el crecimiento de la planta y raíces (Kabata-Pendías, 2001).

La aplicación de pesticidas, funguicidas y fertilizantes contienen trazas de elementos como arsénico, cobre, manganeso, plomo y zinc, lo que lleva al incremento en la concentración de dichos elementos en suelos, uvas y vinos (Fiket et al., 2011).

## **Molibdeno (Mo)**

Las concentraciones medias varían entre 0,65 - 0,94 ppm, alcanzando un máximo de 1,68 ppm. La mediana presenta un valor de 0,78 ppm. Kabata-Pendías (2001) declara que el molibdeno posee un origen litogénico íntimamente asociado a rocas magmáticas ácidas y sedimentos arcillosos ricos en materia orgánica. Posee un comportamiento calcófilo y litófilo.

El molibdeno corresponde a un micronutriente esencial, ya que participa en la fijación de nitrógeno y como constituyente de enzimas (molibdoenzimas) (Alloway, 2008). Kabata-Pendías (2001) establece que el rol del molibdeno en las enzimas está relacionado con su función redox, que se ve reflejada en su cambio de valencia entre  $Mo^{6+}$  y  $Mo^{+5}$ . Ivchenko (1988) declara que también posee una alta concentración en ácidos nucleicos y que tiene un efecto inhibitorio y regulador de ciertas funciones en actividades enzimáticas en el ADN Y ARN.

Deficiencias en su suministro provocan clorosis en el margen de hojas, además de la caída y deformación de estas debido al exceso de concentración de  $NO_3$  y destrucción de tejidos

embrionarios. Para el caso particular de la uva, esta muestra una sensibilidad baja a la deficiencia de molibdeno (Alloway, 2008).

Según Kabata-Pendías (2001), la toxicidad producto de elevadas concentraciones producen modificación del color de las hojas (amarillo-marrón) y disminución del crecimiento del sistema radicular.

## **Cobre (Cu)**

Las concentraciones medias varían entre 34,6-43,3 ppm, alcanzando un máximo de 63,7 ppm, además. La mediana presenta un valor de 39,1 ppm.

El cobre corresponde a un micronutriente esencial, ya que es constituyente de enzimas, participa en los procesos de fotosíntesis, respiración, metabolismo de proteínas y carbohidratos, y en lignificación y formación del polen (Alloway, 2008).

Deficiencias en su suministro provocan marchitez, melanismo y puntas blancas retorcidas, disminución en la formación de panículas, alteración de la lignificación, desarrollo y fertilidad del polen. Para el caso particular de la uva, esta muestra una sensibilidad media a la deficiencia de cobre (Alloway, 2008).

La toxicidad producto de altos niveles de cobre produce cambios en la permeabilidad de la membrana celular y en el contenido lípido, además de pérdida de polipéptidos asociados a actividades fotoquímicas. Síntomas de exceso de cobre en el tejido vegetal serían el oscurecimiento de las hojas inducidas por clorosis de hierro, engrosamiento, acortamiento o formación de raíces en forma de alambres de púas (Kabata-Pendías, 2001).

El origen litogénico de cobre estaría asociado principalmente a material heredado desde rocas intermedias a máficas (Kabata-Pendías, 2001). No obstante, la actividad agrícola correspondería a una fuente antropogénica difusa de cobre. Salminen et al., (2005) afirma que el extensivo empleo de compuestos en base a cobre en la agricultura, es una potencial fuente de concentraciones anómalas de aquel elemento. La asociación de Cu-Mo-Sb en el material particulado atmosférico ha sido reportado en emisiones no asociada a la combustión de combustibles fósiles, sino, a la liberación debido a la abrasión mecánica de estructuras metálicas de automóviles, asociados al sistema de motor, de neumáticos y de frenos (Dongarra et al., 2007).

El potencial ambiental de la toxicidad de cobre radica en el tiempo de residencia de este. Bowen (1980), estimó, para suelos de clima templado, que el tiempo de residencia varía entre 1000 a 1500 años, indicando que la remoción total de este elemento es algo improbable.

## **Plomo (Pb)**

Las concentraciones medias varían entre 13,46-15,35 ppm, alcanzando un máximo de 18,51 ppm. La mediana presenta un valor de 14,45 ppm. Kabata-Pendías (2001) establece que tiende a concentrarse en series de rocas magmáticas ácidas y sedimentos arcillosos. El plomo primario posee un origen geogénico, el cual es incorporado en minerales en el tiempo de su formación. El origen secundario es radiogénico, asociado al decaimiento de uranio y torio. Tiene un comportamiento altamente calcófilo.

Kabata-Pendías (2001) establece que el plomo no presenta un rol biológico para las plantas.

La toxicidad producto a altas concentraciones de plomo provocaría el oscurecimiento de hojas, marchitez de hojas antiguas, desarrollo deficiente del follaje y acortamiento del sistema radicular (Kabata-Pendías, 2001). La absorción por el sistema radicular es considerada como la vía principal de incorporación de dicho metal a la biomasa de la planta (Lin et al., 1995).

El ciclo bioquímico del plomo es significativamente afectado por el humano (Nriagu, 1978). Estimaciones de emisiones de plomo indican que la atmosfera corresponde al mayor reservorio inicial de este, y que la contribución antrópica es al menos uno o 2 órdenes mayor con respecto a fuentes naturales (Mihaljevic et al., 2006).

El origen antropogénico del plomo es uno de los temas de mayor interés a nivel mundial, el cual ha sido relacionado a actividad industrial (Salminen et al., 2005). Cabe recordar que hasta el año 2001 en Chile se permitió el uso de gasolinas enriquecidas en plomo (MMA, 2011). La aplicación de pesticidas, funguicidas y fertilizantes contienen trazas de elementos como arsénico, cobre, manganeso, plomo y zinc, lo que lleva al incremento en la concentración de dichos elementos en suelos, uvas y vinos (Fiket et al., 2011).

## **Zinc (Zn)**

Las concentraciones medias varían entre 67,7-103,7 ppm, alcanzando un máximo de 267,7 ppm. La mediana presenta un valor de 75,9 ppm. Kabata-Pendías (2001) establece que presenta mayores concentraciones en rocas máficas que en rocas ácidas, posee una tendencia calcófila. Presenta una concentración natural en todos los tipos de suelo y esta depende en gran medida de la composición química del material parental (Alloway et al., 2013).

Alloway (2008) afirma que el zinc corresponde a un micronutriente esencial, constituyente de enzimas que participan en la síntesis de carbohidratos y proteínas, mantiene la integridad de las membranas, regula la síntesis de auxina y la formación de polen.

Síntomas de deficiencias de zinc corresponde a la clorosis intervenal y estancamiento del crecimiento. Para el caso particular de la uva, esta muestra una sensibilidad baja a la deficiencia de este elemento (Alloway, 2008). Larcher y Nicolini (2008) reportan que el zinc presenta una concentración superior a 1 ppm en la uva.

Por otra parte, síntomas de toxicidad por niveles alto de concentración de zinc se manifiesta en puntas de hojas necróticas, clorosis intervenal en hojas nuevas, crecimiento retardado de la planta en su totalidad y en daños al sistema radicular (Kabata-Pendías, 2001).

En lo que respecta a vinos, la asociación con cadmio, níquel y zinc frecuentemente está relacionado a contaminación asociada a prácticas enológicas (Lara et al., 2005; Pohl, 2007) o a fuentes asociadas a emisiones industriales (Kment et al., 2005). Además, la aplicación de pesticidas, funguicidas y fertilizantes contienen trazas de elementos como arsénico, cobre, manganeso, plomo y zinc, lo que lleva al incremento en la concentración de dichos elementos en suelos, uvas y vinos (Fiket et al., 2011).

## **Níquel (Ni)**

Las concentraciones medias varían entre 19,3-30,2 ppm, alcanzando un máximo de 95,4 ppm. La mediana presenta un valor de 24,2 ppm. Presenta mayores concentraciones en rocas ultramáficas, y su concentración decrece con el aumento de acidez de estas. Geoquímicamente presenta un comportamiento siderófilo y calcófilo (Kabata-Pendías, 2001).

Corresponde a un microelemento esencial, ya que es constituyente de la enzima ureasa, participa en la asimilación de nitrógeno, y protege a la enzima nitrato reductasa contra la inactivación (Kabata-Pendías, 2001).

El origen natural en suelos se encuentra relacionado altamente a la composición de la roca parental (Alloway et al., 2013). No obstante, estudios reconocen que fundiciones de cobre y la combustión de combustibles fósiles son una importante fuente de emisiones antropogénicas (Kabata-Pendías, 2011). Valdés et al. (2013), caracterizó la combustión de petróleo con una traza química compuesta principalmente por cobalto, cromo, níquel y antimonio. Moreno (2010) afirma que la industria y el tráfico vehicular tienen la capacidad de emitir ciertos elementos traza como el níquel en concentraciones suficiente como para la generación de enriquecimiento de dicho metal.

## **Cobalto (Co)**

Las concentraciones medias varían entre 16,9-23,5 ppm, alcanzando un máximo de 44,8 ppm. La mediana presenta un valor de 20,5 ppm. Presenta una mayor concentración en rocas ultramáficas en comparación con rocas ácidas (Kabata-Pendías, 2001).

Si bien, aun no es claro de si es o no esencial para las plantas, Reisenauer et al, (1973) reporta favorables efectos en el crecimiento de plantas. Tiene participación en la fijación simbiótica de nitrógeno molecular, y (aún en revisión), que cambios en su estadio de valencia estimularía la síntesis de clorofila y proteínas (Kabata-Pendías, 2001).

Síntomas de toxicidad de cobalto en plantas provocaría daños como clorosis intervenal de hojas nuevas y daño a las puntas de raíces (Kabata-Pendías, 2001).

Si bien, el origen natural de cobalto se encuentra relacionado en gran medida a la composición de la roca madre (Alloway et al., 2013). Sin embargo, existen fuentes antropogénicas que aumentarían su concentración. Valdés et al. (2013) caracterizó la combustión de petróleo con una traza compuesta principalmente por cobalto, cromo, níquel y antimonio.

## **Arsénico (As)**

Las concentraciones medias varían entre 6,9-10,3 ppm, alcanzando un máximo de 14,2 ppm. La mediana presenta un valor de 8,3 ppm. Se distribuye uniformemente en la mayoría de los tipos de rocas, solo en sedimentos arcillosos presenta una concentración mayor. Presenta una tendencia calcófila (Kabata-Pendías, 2001)

Si bien es un constituyente de la mayoría de las plantas, aún existe poco conocimiento sobre su función bioquímica. Diversos estudios enfocados en la relación entre la concentración de arsénico y su concentración en la vegetación, sugieren que estas últimas adquieren el arsénico de manera pasiva a través del flujo de agua (Kabata-Pendías, 2001).

Síntomas de toxicidad de arsénico en plantas provocaría necrosis en hojas antiguas, modificación del color en el sistema radicular y marchitez de hojas nuevas (Kabata-Pendías, 2001).

La aplicación de pesticidas, funguicidas y fertilizantes contienen trazas de elementos como arsénico, cobre, manganeso, plomo y zinc, lo que lleva al incremento en la concentración de dichos elementos en suelos, uvas y vinos (Fiket et al., 2011).

El arsénico corresponde a uno de los elementos químicos que representa de una de las mayores preocupaciones ambientales, debido a su potencial riesgo para la salud humana. En

muchos lugares del orbe, concentraciones de arsénico total sobre 50 mg/kg se consideran dañinas y sobre esta, procedimientos para remediar su concentración son recomendadas (Adriano, 2001).

### **Antimonio (Sb)**

Las concentraciones medias varían entre 0,73-1,08 ppm, alcanzando un máximo de 1,2 ppm. La mediana presenta un valor de 0,93 ppm. En la corteza su abundancia es baja, encontrándose una mayor concentración en sedimentos arcillosos. Su comportamiento geoquímico se asemeja al del arsénico, con regularidad se presenta con valencia +3 y ocasionalmente +5 mostrando un comportamiento anfótero. Posee propiedades calcófilas y frecuentemente se encuentra asociado a depósitos de sulfuros de diversos metales (Kabata-Pendías, 2001).

Origen antropogénico de antimonio se encuentra asociado a la combustión de combustibles fósiles, a su empleo en el sistema de frenos y neumáticos en vehículos, en la elaboración de baterías, pinturas y otros insumos empleados (Reimann et al., 2010).

En lo que respecta al medio ambiente, su concentración se utiliza como indicador de contaminación industrial. Los oxi-hidróxidos de hierro presentan una fuerte absorción y adsorción de este elemento, favoreciendo el enriquecimiento de antimonio de origen antropogénico (Alloway et al., 2013).

### **Vanadio (V)**

Las concentraciones medias varían entre 166-221 ppm, alcanzando un máximo de 698 ppm, La mediana presenta un valor de 187 ppm. Se encuentra concentrado principalmente en rocas de composición máficas y rocas sedimentarias como lutitas (Kabata-Pendías, 2001).

Si bien, la existencia de este elemento se encuentra de manera natural y su concentración depende en gran medida de la composición química del material parental (Alloway et al., 2013), estudios llevados a cabo por Artaxo et al. (1996) y Moreno (2010) plantean que el vanadio sería un trazador químico de la combustión asociada al petróleo.

## **Cromo (Cr)**

Las concentraciones medias varían entre 65-100 ppm, alcanzando un máximo de 178 ppm. La mediana presenta un valor de 76 ppm. Su mayor abundancia se encuentra asociada principalmente a rocas máficas y ultramáficas (Kabata-Pendías, 2001).

Si bien no hay clara evidencia del rol esencial del cromo en el metabolismo de las plantas, Mertz (1969) destaca los efectos positivos en el crecimiento de plantas en la aplicación a suelos.

Síntomas de niveles tóxicos de cromo estarían asociados a la clorosis de hojas nuevas y daños al crecimiento del sistema radicular (Kabata-Pendías, 2001).

Origen antropogénico estaría relacionado a la combustión de combustibles fósiles. Salma (2005) reconoció que el cromo presente en el material particulado se asocia al tráfico vehicular. Valdés et al (2013), reconoció al cromo como parte de la traza química asociada a la combustión de combustibles de petróleo.

### **5.1.3 Factor de enriquecimiento**

De la Tabla 4-3 se desprende que los elementos correspondientes a potasio (K), estaño (Sn) y hafnio (Hf) poseen un origen netamente litogénico. Por otra parte, el hierro (Fe), calcio (Ca), fósforo (P), magnesio (Mg), titanio (Ti), aluminio (Al), sodio (Na), manganeso (Mn), molibdeno (Mo), cobre (Cu), plomo (Pb), zinc (Zn), plata (Ag), níquel (Ni), cobalto (Co), uranio (U), torio (Th), estroncio (Sr), bismuto (Bi), vanadio (V), lantano (La), cromo (Cr), bario (Ba), wolframio (W), escandio (Sc), Itrio (Y), cerio (Ce), prometeo (Pr), neodimio (Nd), samario (Sm), europio (Eu), gadolinio (Gd), terbio (Tb), disprosio (Dy), holmio (Ho), erbio (Er), tulio (Tm), iterbio (Yb), litio (Li), rubidio (Rb), tántalo (Ta), niobio (Nb), cesio (Cs), galio (Ga), indio (In) y talio (Tl) poseen una contribución litogénica y antrópica. Finalmente, el arsénico (As) y antimonio (Sb) poseen una fuerte contribución antrópica.

Para realizar el factor de enriquecimiento se utilizaron los valores puntuales promedios definidos por Taylor & McLennan (2009) como referencia para llevar a cabo la normalización de la base de datos geoquímica. Reimann & Caritat (2000, 2005) exponen que el concepto de normalizar la concentración con un valor promedio puntual es cuestionable, debido que no toma en consideración los siguientes puntos:

- (1) La composición heterogénea de la corteza terrestre, por lo tanto, tomar un valor puntual no es representativo.
- (2) Procesos naturales de fraccionamiento que ocurren en las cercanías de la superficie
- (3) La solubilidad diferencial de los minerales con respecto a la digestión química utilizada para distintos estudios

- (4) La importancia de los procesos biogeoquímicos para la distribución de las concentraciones de los elementos

Otro punto de importancia, es el hecho de los valores presentes en la compilación de Taylor & McLennan (2009), no reflejan la geoquímica del área de estudio, ya que como se ha expuesto anteriormente, la composición química de los suelos se encuentra principalmente heredada del material parental. De modo que, lo más correcto sería tomar como referencia valores definidos en base a las formaciones geológicas presentes en la zona de estudio, las cuales corresponden a la formación Navidad y a los intrusivos del Triásico-Jurásico principalmente. No obstante, ante la ausencia de valores geoquímicos representativos del fondo geoquímico natural de la zona de estudio se debió utilizar la compilación mencionada anteriormente.

Por lo anteriormente mencionado, es que no se debe hacer un uso indiscriminado del factor de enriquecimiento. Los valores determinados mediante el empleo de dicha herramienta deben ser añadidos a un análisis integral que considere un análisis multivariable, con el objetivo de dilucidar la proveniencia de algún elemento en cuestión.

## 5.2 Asociaciones geoquímicas

En el siguiente apartado se discuten las asociación geoquímicas obtenidas mediante el empleo del análisis factorial, destacar que solo se analizan las asociaciones que posean al menos un elemento como señal principal y secundaria.

### **Factor 1**

El factor 1 representa el 37,04% de la variabilidad total de datos, la primera asociación incluye los elementos Fe, Ti, Mn, Mo, Cu, Zn, Co, Th, Sb, V, La, Cr, W, Zr, Sn, Sc, Hf, Ta, Nb, Ga, In, REE, (Pb), (Ag), (Ni), (As), (U), (Bi), (Cs). La segunda asociación se compone de -Na, -K, -Sr, además de (-Ca) y (-Rb).

Los resultados del análisis de correlación múltiple (Tabla 4-4) muestran que entre los elementos de la primera y segunda asociación geoquímica existen 51 pares de elementos correlacionados negativamente entre si (exceptuando REE).

La totalidad de los elementos definidos para la primera asociación geoquímica sugiere un origen netamente natural-litogénico, y en particular aquellos elementos que representan el mayor factor de carga ( $>0,75$ ) (Tabla 5-2), presentan un origen heredado principalmente del material parental proveniente de la meteorización de minerales máficos. Kabata-Pendías (2001) presenta una recopilación de las concentraciones promedios de los elementos presentados anteriormente, en

la cual expone que el Fe, Ti, Co, Mn, V presentan una mayor concentración en series máficas (Tabla 5-3).

Tabla 5-2 Factor de carga (>0,75) para elementos del factor 1.

Elemento	Factor de carga (F1)
Fe	0,858
Ti	0,815
Mn	0,767
Mo	0,794
Zn	0,813
Co	0,798
V	0,826
Sn	0,796
Ta	0,773
Nb	0,744

Tabla 5-3 Concentración promedio para Fe, Ti, Mn, Mo, Zn, Co, V, Sn, Ta y Nb en rocas ígneas y sedimentarias. Modificado de Kabata-Pendías (2001).

Tipo de roca	Fe (wt%)	Ti (wt%)	Mn (ppm)	Mo (ppm)	Zn (ppm)	Co (ppm)	V (ppm)	Sn (ppm)	Ta (ppm)	Nb (ppm)
<b>Rocas ígneas</b>										
Ultramáficas	9,4-10	0,03-0,5	850-1500	0,2-0,3	40-60	100-200	40-100	0,35-0,5	0,02-1	1-15
Máficas	5,6-8,7	0,9-1,5	1200-2000	1-1,5	80-120	35-50	200-250	0,9-1,5	0,5-1	10-20
Intermedias	3,7-5,9	1,3-1,5	500-1200	0,6-1	40-100	1-10	30-100	1,3-1,5	0,7-2,1	20-35
Ácidas	1,4-2,7	1,5-3,6	350-600	1-2	40-60	1-7	40-90	1,5-3,6	2-4	15-25
<b>Rocas sedimentarias</b>										
Arcillolitas	3,3-4,7	6-10	400-800	2-2,6	80-120	14-20	80-130	6-10	0,8-1,5	15-20
Lutitas	4,3-4,8	6	500-850	0,7-2,6	80-120	11-20	100-130	6	1-2	15-20
Areniscas	1-3	0,5	100-500	0,2-0,8	15-30	0,3-10	10-60	0,5	0,05	0,05
Calizas, dolomitas	0,4-1	0,5	200-1000	0,16-0,4	10-25	0,1-3,0	10-45	0,5	0,05	0,05

Del análisis del mapa de distribución para los elementos pertenecientes a la primera asociación del factor 1 (Figura 5-5), se desprende que las zonas de altas concentraciones se presentan en el margen oriental-suroriental de la zona de estudio, coincidiendo con la distribución de la unidad San Antonio, específicamente, a la sub-unidad Ortogneis definida por Contreras (2015) (Figura 2-9). Dicha subunidad presenta minerales máficos como biotita y hornblenda, cuya meteorización proveería los elementos en cuestión.

La asociación de elementos compuesta por Na, Sr, K, (Ca), (Rb) propone un origen natural (litogénico o pedogénico), ya que la totalidad de elementos presentan un comportamiento litófilo (White, 2005).

De los mapas de distribución de los elementos de la segunda asociación del factor 1 (Figura 5-6), se observa la presencia de dos zonas de alta concentración: el margen occidental y el margen nor-oriental. El margen occidental coincidiría con el emplazamiento de la distribución de la sub unidad: conglomerados y areniscas Contreras (2015), la cual como se mencionó anteriormente, se encuentra asociada a la formación Navidad (Gana *et al.*, 1996). Por otra parte, el margen nor-oriental estaría relacionado con la distribución de la unidad San Antonio, específicamente, a la sub-unidad Ortogneis Contreras (2015) (Figura 2-9).

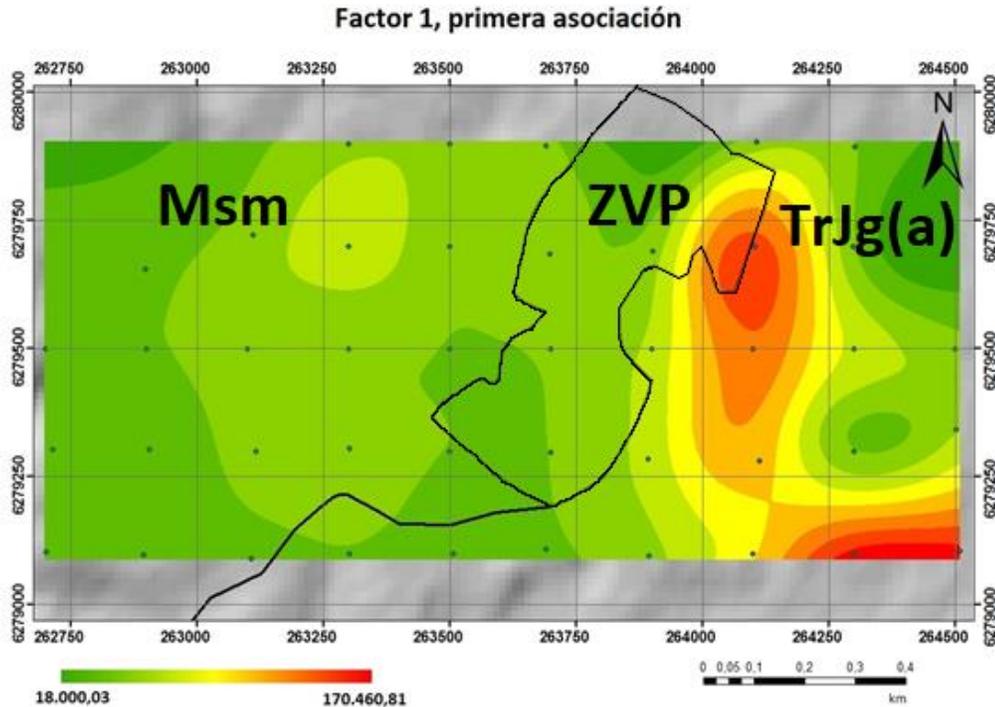


Figura 5-5 Distribución espacial de la primera asociación geoquímica del factor 1, que incluye los elementos Ti, Mn, Mo, Cu, Zn, Co, Th, Sb, V, La, Cr, W, Zr, Sn, Sc, Hf, Ta, Nb, Ga, In, REE, (Pb), (Ag), (Ni), (As), (U), (Bi), (Cs). Msm: Secuencia sedimentaria Malvilla; ZVP: Zona de plantación de viñedos; TrTg(a) Sub-unidad Ortogneis, definidas por Contreras (2015).

El margen occidental coincide con la presencia de las mayores concentraciones de los elementos Na (-0,713), Sr (-0,735) y Ca (-0,456). Reimann & de Caritat (1998) establecen que los elementos Ca y Sr tienen tendencia a sustituirse en la estructura de minerales carbonatados como calcita y dolomita. Por lo tanto, la meteorización de dichos minerales pertenecientes a la formación Navidad suministraría a los suelos los elementos Ca y Sr, como también, respondería a la concentración de Na, debido al hecho de que el material parental perteneciente a la formación Navidad fue depositado en ambiente marino (Figura 5-7).

Con respecto al margen oriental, no se desprende un patrón que coincida con la distribución de los elementos Sr, Na, Ca, K y Rb (señal difusa).

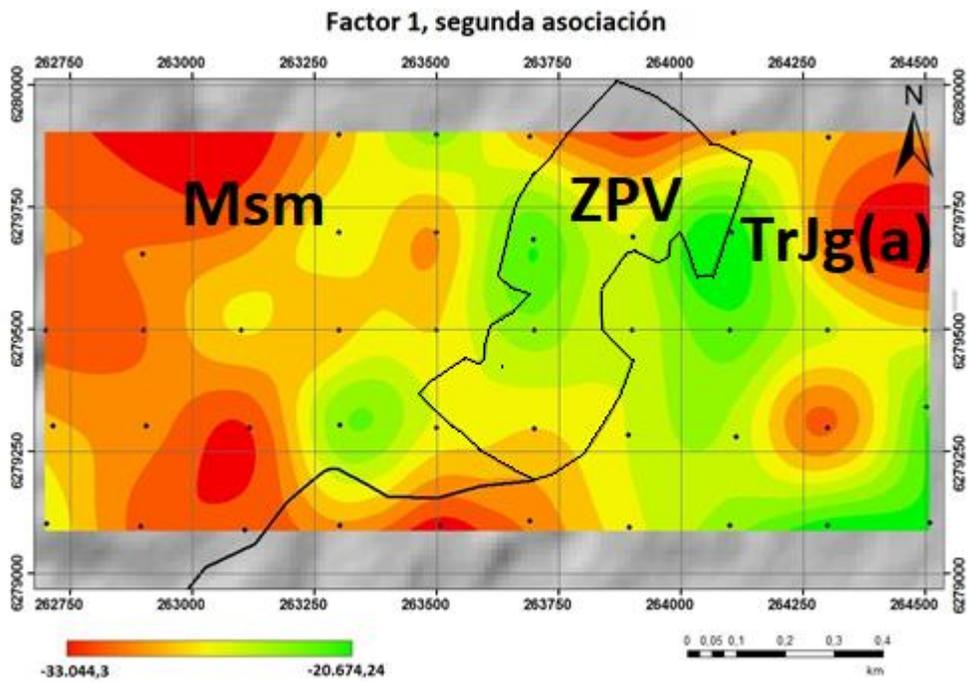


Figura 5-6 Distribución espacial de la segunda asociación geoquímica del factor 1, que incluye los elementos Na, Sr, K, (Ca) y (Rb). Msm: Secuencia sedimentaria Malvilla; ZPV: Zona de plantación de viñedos; TrTg(a) Sub-unidad Ortogneis, definidas por Contreras (2015).

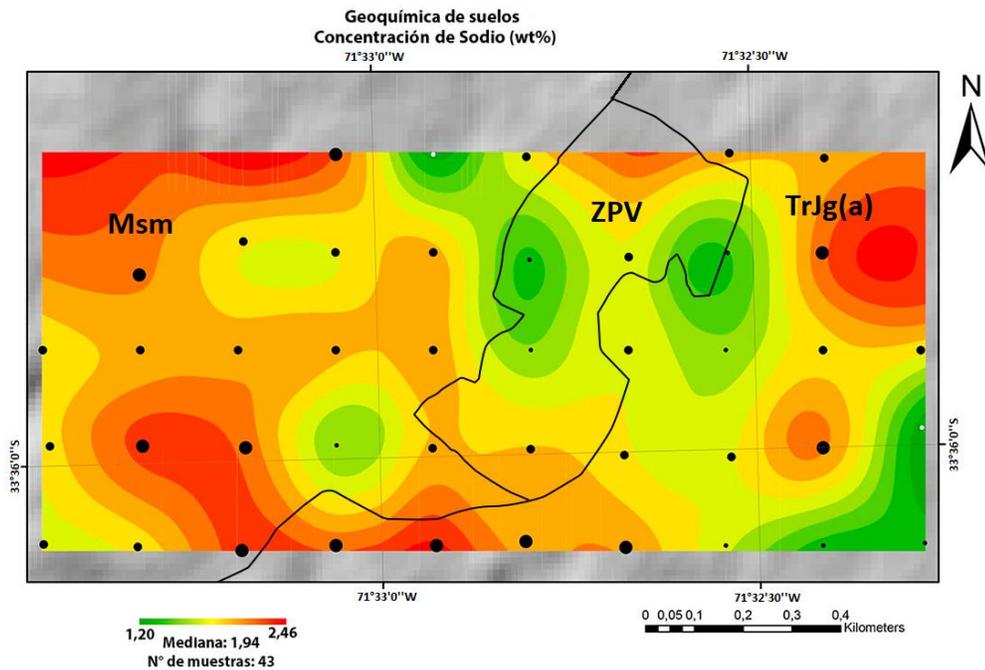


Figura 5-7 Distribución espacial del elemento sodio. Msm: Secuencia sedimentaria Malvilla; ZPV: Zona de plantación de viñedos; TrTg(a) Sub-unidad Ortogneis, definidas por Contreras (2015).

## Factor 2

El factor 2 representa el 17,8% de variabilidad total de la base de datos. La primera asociación se compone de Ti, Mn y V, (Fe), (Mo), (Zn), (Co), (Cr), (Sn), (Ta) y (Nb). La segunda asociación se compone de -Al, -Li y -Ti, -REE, (-Cu), (-Ba), (-Rb), (-Cs) y (-La).

Los resultados del análisis de correlación múltiple (Tabla 4-4) muestran que entre los elementos de la primera y segunda asociación geoquímicas existen 15 pares correlacionados negativamente.

La primera asociación es análoga a los elementos presentados en la Tabla 5-2. (Kabata-Pendías, 2001) establece que la mayor abundancia de dicho elemento se encontraría asociada a rocas máficas y ultramáficas.

De la observación del mapa de distribución espacial (Figura 5-8) se observa que su distribución coincide con emplazamiento de la unidad San Antonio, específicamente, a la sub-unidad Ortogneis definida por Contreras (2015) (Figura 2-9). Por lo tanto, la asociación compuesta por Ti, Mn y V, (Fe), (Mo), (Zn), (Co), (Cr), (Sn), (Ta) y (Nb) sugiere un origen netamente natural-litogénico, heredada principalmente del material parental proveniente de la meteorización de minerales máficos (biotita y hornblenda) presentes en la unidad geológica mencionada anteriormente.

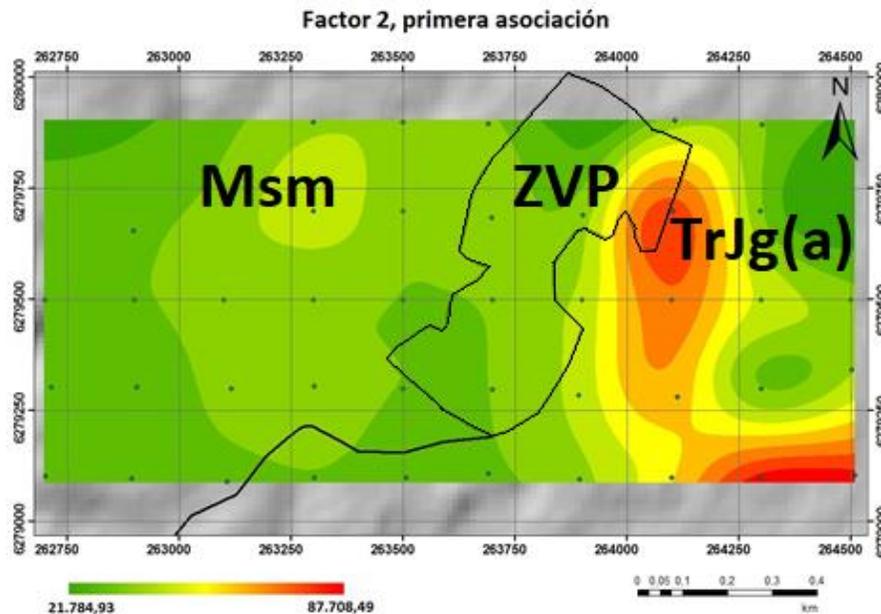


Figura 5-8 Distribución espacial de la primera asociación geoquímica del factor 2, que incluye los elementos Ti, Mn, V, (Fe), (Mo), (Zn), (Co), (Cr), (Sn), (Ta), (Nb), (Sb) y (Hf). Msm: Secuencia sedimentaria Malvilla; ZVP: Zona de plantación de viñedos; TrJg(a) Subunidad Ortogneis, definidas por Contreras (2015).

En lo que respecta a la distribución espacial de la segunda asociación del factor 2 (Figura 5-9) no se distingue un patrón que de explicación a la distribución de los elementos Al, Li, Tl, REE, Cu, Ba, Rb, Cs y La (señal difusa).

### Factor 3

El factor 3 representa el 13,25% de la variabilidad total de la base de datos. La primera asociación se compone de Ca, Mg, Ni, Cr y Sc y (Ga). Por otra parte, la segunda señal se compone de -K, -As, -Sb, -Ba, -W, -Zr, -Hf, -Cs, (-Pb), (-Li), (-Rb) y (-Na).

Los resultados del análisis de correlación múltiple (Tabla 4-4) muestran que entre los elementos de la primera y segunda asociación geoquímica existen 21 pares correlacionados negativamente entre si.

De la observación del mapa de distribución espacial de la primera asociación del factor 3 (Figura 5-10) se observa que la concentración máxima de dicho factor coincide con el emplazamiento de la secuencia Malvilla (Contreras, 2015).

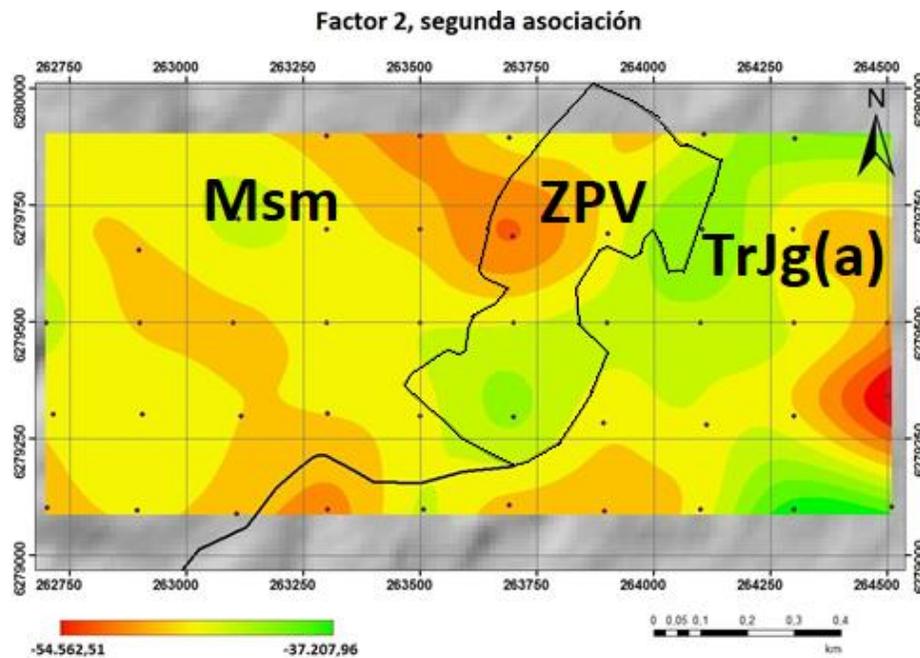


Figura 5-9 Distribución espacial de la segunda geoquímica del factor 2, que incluye los elementos -Al, -Li, -Tl, -REE, (-Cu), (-Ba), (-Rb), (-Cs) y (-La). Msm: Secuencia sedimentaria Malvilla; ZPV: Zona de plantación de viñedos; TrTg(a) Sub-unidad Ortogneis, definidas por Contreras (2015).

En particular, los elementos Ca y Mg, correspondientes a los elementos que contribuyen con el mayor factor de carga para la primera asociación del factor 3 (0,777 y 0,855, respectivamente), su distribución (Figura 5-2 y Figura 5-4, respectivamente) presentan una alta concentración en el margen occidental-noroeste de la zona de estudio, coincidiendo con la distribución de las unidades Secuencia Malvilla (Contreras, 2015) (Figura 2-9). Reimann & de Caritat (1998) establecen que los elementos Ca y Mg tienen tendencia a sustituirse en la estructura de minerales carbonatados como calcita y dolomita. Por lo tanto, la meteorización de dichos minerales calcáreos pertenecientes a la Secuencia Malvilla explicaría dicha concentración en los suelos suprayacentes.

De la observación del mapa de distribución espacial de la segunda asociación del factor 3 (Figura 5-11) no se desprende un patrón que de explicación la distribución de la asociación compuesta por los elementos Sb, As, K, Ba, Ba, W, Zr, Hf, Cs, (Pb), (Li) y (Rb) y (Na).

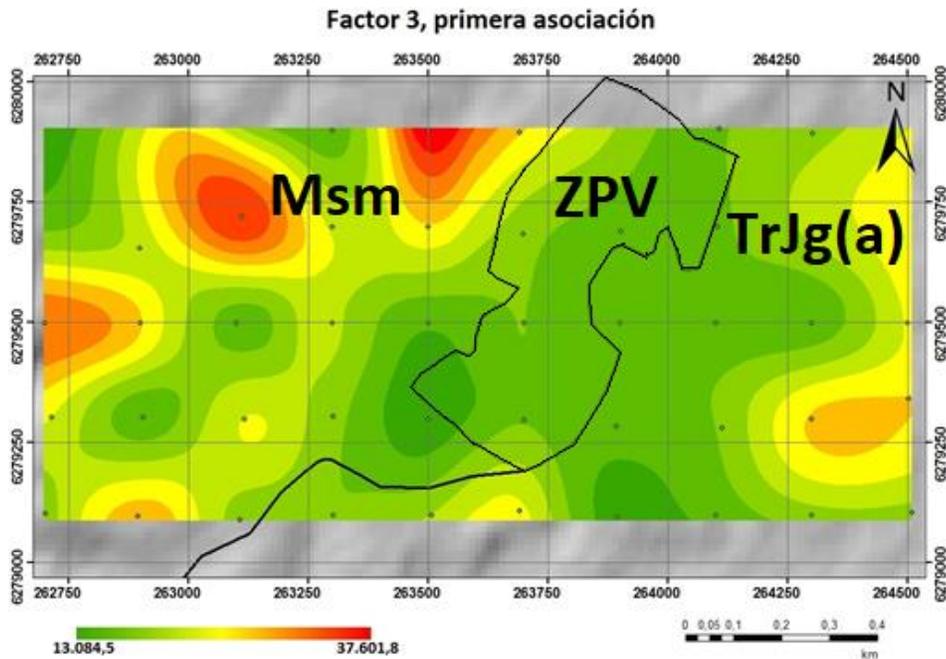


Figura 5-10 Distribución espacial de la primera asociación geoquímica del factor 3, que incluye los elementos Ca, Mg, Ni, Cr y Sc y (Ga). Msm: Secuencia sedimentaria Malvilla; ZPV: Zona de plantación de viñedos; TrTg(a) Sub-unidad Ortogneis, definidas por Contreras (2015).

Sin embargo, los elementos Sb y As, correspondientes a los elementos que contribuyen con el mayor factor de carga para la segunda asociación del factor 3 (-0,667 y -0,601, respectivamente) poseen una distribución (Figura 5-12 y Figura 5-13, respectivamente) que coincide con el emplazamiento de plantaciones de vid (Figura 2-10), de hecho, es importante destacar que ambos elementos poseen la mayor contribución antrópica según el factor de enriquecimiento (Tabla 4-3).

Lo anterior podría explicarse a la intervención de suelos in situ, ya que el material que conforma los suelos de dicha zona corresponde a un suelo trabajo proveniente de una fuente externa, además la manipulación mediante el empleo de pesticidas, funguicidas y fertilizantes contienen trazas de elementos como arsénico, cobre, manganeso, plomo y zinc, lo que llevaría al incremento en la concentración de dichos elementos en suelos, uvas y vinos (Fiket et al., 2011).

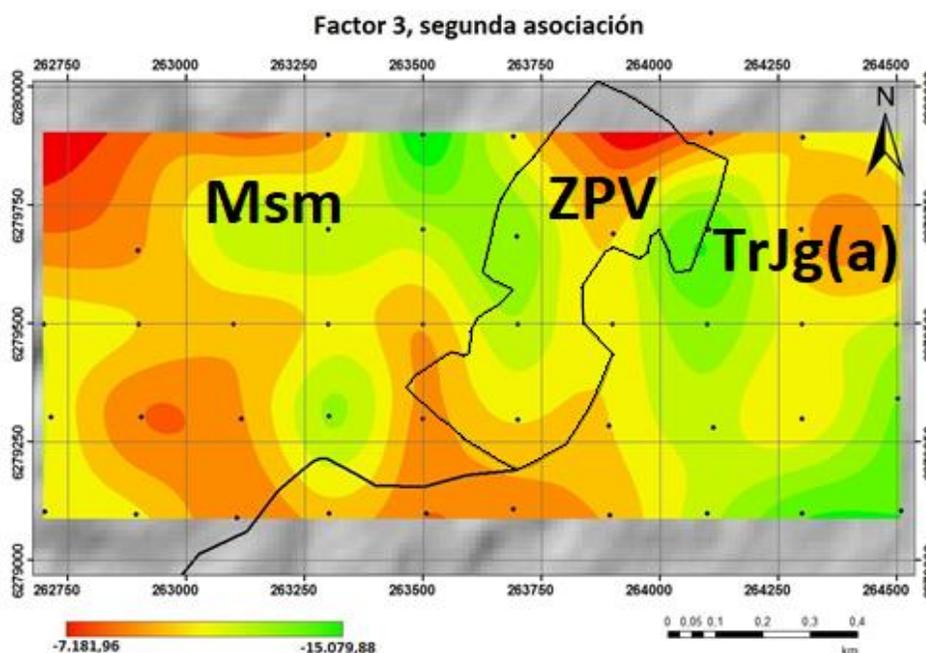


Figura 5-11 Distribución espacial de la segunda asociación geoquímica del factor 3, que incluye los elementos Sb, As, K, Ba, W, Zr, Hf, Cs, (Pb), (Li) y (Rb) y (Na). Msm: Secuencia sedimentaria Malvilla; ZPV: Zona de plantación de viñedos; TrTg(a) Sub-unidad Ortogneis, definidas por Contreras (2015).

## Factor 4

El factor 4 representa el 4,84 de la variabilidad total de la base de datos. La primera asociación se compone de Tl, (Ga), (In), (Rb), (Ce), (Th), (Al), además de una señal principal inversa de Ni.

Los resultados del análisis de correlación múltiple (Tabla 4-4) muestran que no se presentan correlaciones negativas con respecto al níquel. Los elementos Al, Tl, Ga e In pertenecen al grupo III A, por lo tanto, poseen un comportamiento químico similar. La relación con el níquel es compleja (señal difusa).

En lo que respecta a su distribución (Figura 5-14) se observa que coincide con la ubicación de unidad San Antonio, específicamente, a la sub-unidad Ortogneis definida por Contreras (2015) (Figura 2.10). En el trabajo anterior, se reporta la presencia de mineralogía aluminosilicatada (plagioclasa, muscovita, epidota y sericita), cuya meteorización proveería de aluminio y elementos asociados a este a los suelos de la zona de estudio.

## Factor 6

El factor 6 representa el 3,11% de la variabilidad total de la base de datos. Se compone de una asociación geoquímica compuesta por P, (K) y (Cu).

Los resultados del análisis de correlación múltiple (Tabla 4-4) muestran que entre los elementos no existe ningún tipo de correlación.

Sin embargo, los mapas de distribución (Figura 5-15) muestran que sus concentraciones más altas coinciden con el emplazamiento norte de la zona de plantación de vid.

La aplicación de pesticidas, funguicidas y fertilizantes (para el aumento de macroelementos como P y K) contienen trazas de cobre, lo que llevaría al incremento en la concentración de metal en suelos, y posteriormente en uvas y vino (Fiket et al., 2011).

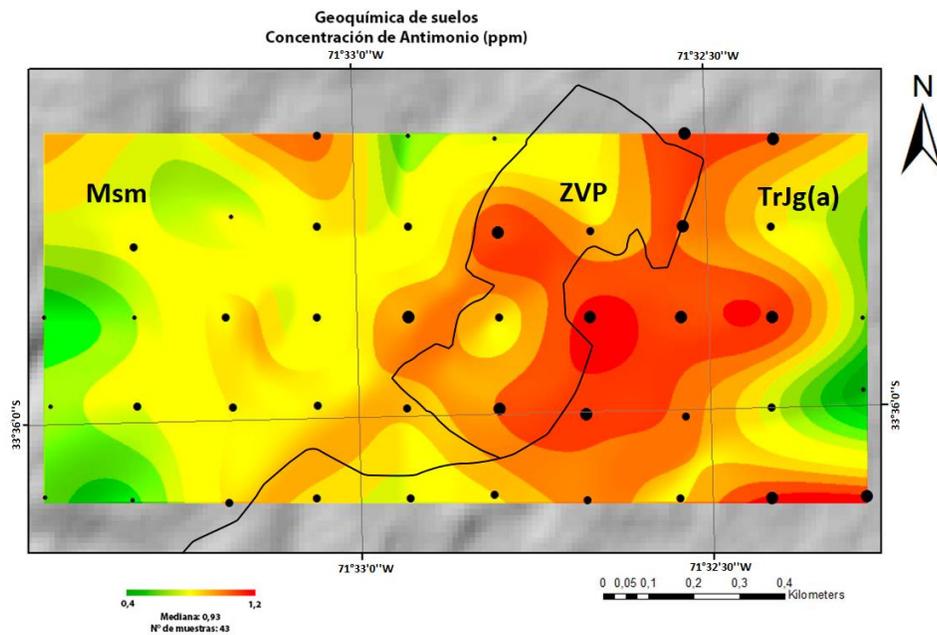


Figura 5-12 Distribución espacial del elemento antimonio. Msm: Secuencia sedimentaria Malvilla; ZVP: Zona de plantación de viñedos; TrTg(a) Sub-unidad Ortogneis, definidas por Contreras (2015).



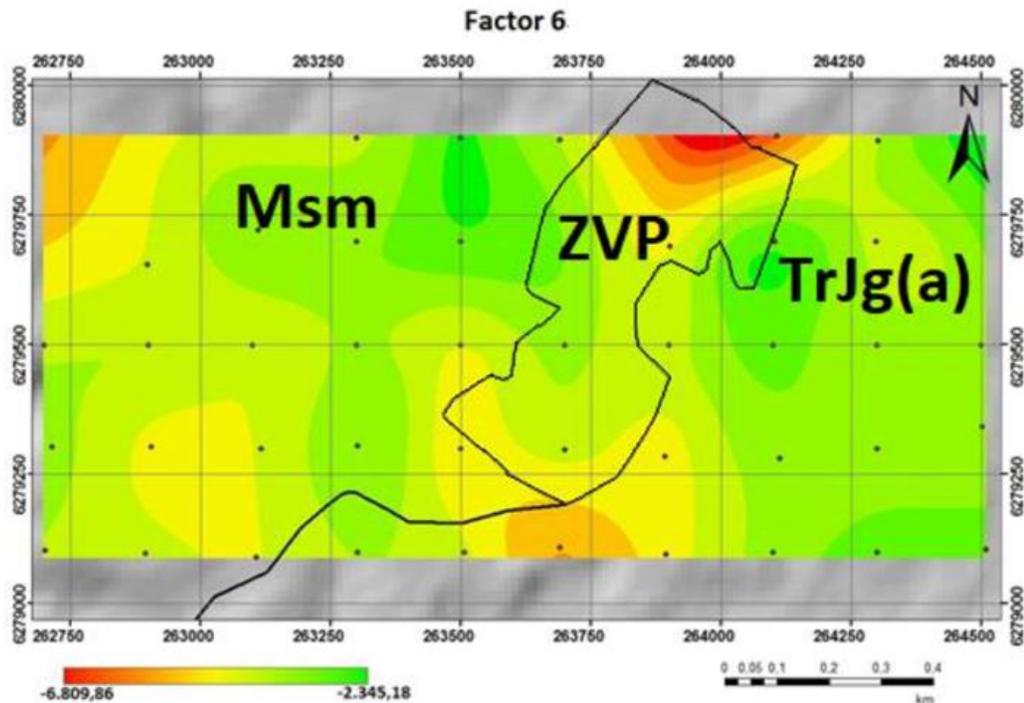


Figura 5-15 Distribución espacial de la asociación geoquímica del factor 6, que incluye los elementos P, (K) y (Cu). Msm: Secuencia sedimentaria Malvilla; ZVP: Zona de plantación de viñedos; TrJg(a) Sub-unidad Ortogneis, definidas por Contreras (2015).

### 5.3 Comparación con estudios y normas internacionales

De la totalidad de elementos que conforman el suelo, se encuentra un grupo que representan un potencial riesgo para la salud y calidad del medio ambiente. Según Kabata-Pendías (2001), los elementos que presentan un mayor peligro corresponden a: plata (Ag), berilio (Be), oro (Au), cadmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), mercurio (Hg), manganeso (Mn), níquel (Ni), plomo (Pb), selenio (Se), antimonio (Sb), estaño (Sn), telurio (Te), vanadio (V), wolframio (W) y zinc (Zn). Alloway (2008) afirma que los elementos que presentan un mayor peligro para el medio ambiente corresponde a: arsénico (As), berilio (Be), cadmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), mercurio (Hg), níquel (Ni), plomo (Pb), selenio (Se), talio (Tl), vanadio (V), zinc (Zn), además de ciertos elementos del grupo de los lantánidos y actínidos.

Anteriormente se han presentado y discutido las principales fuentes de origen de metales y metaloides en suelos (litogénicas, pedogénicas y antropogénicas). Un aspecto de gran importancia es la especialización y localización de dichos elementos. Se sabe que el suelo consiste en un sistema heterogéneo de compuestos orgánicos y minerales, en el cual metales y metaloides se encuentran unidos a: fracciones residuales (silicatos), minerales como carbonatos, fosfatos y sulfuros, óxidos de hierro, aluminio y manganeso, compuestos orgánicos y como sustancias solubles (fases solubles y fases intercambiables) (Figura 5-16). El mecanismo por el cual se encuentran ligados es

variable y depende en gran medida de la composición del suelo y sus propiedades físicas (Kabata-Pendías, 2001).

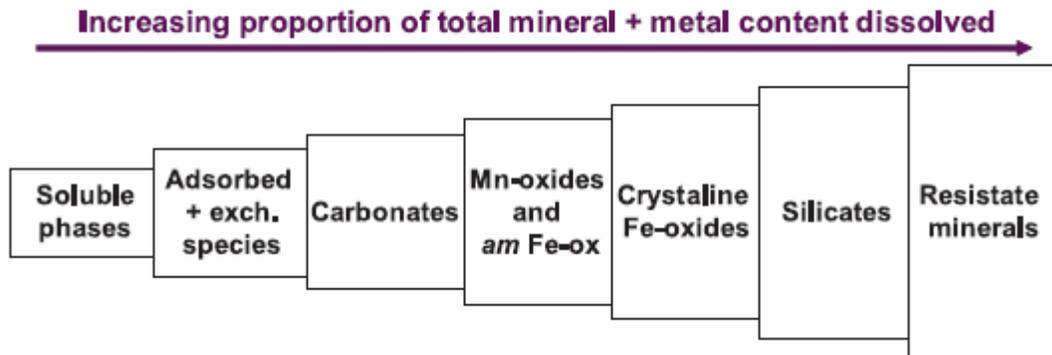


Figura 5-16 Relación entre proporción mineral y biodisponibilidad. Modificada de Cohen et al. (2010).

Rule (1999) realizó una recopilación de la distribución de metales traza en las distintas fases presentes en el sistema suelo-sustrato y concluyó que la más alta proporción de la mayoría de los metales se encuentra asociado a fases residuales o en óxidos de hierro-manganeso, tanto en suelos naturales como en suelos con una alta intervención antrópica.

De acuerdo a lo anterior, y junto con los elementos muestreados en el presente estudio, se ajunta en la Tabla 5-4 un resumen de los valores críticos que han sido definidos en las diferentes normativas internacionales estudiadas (ver 3.5), los cuales fueron empleados para la comparación y evaluación con respecto a la calidad medio ambiental de los suelos presentes en la zona de estudio.

Destacar que el presente estudio midió las concentraciones totales, por lo cual, no se tiene información con respecto a las concentraciones de las fases más disponibles (soluble e intercambiable).

Tabla 5-4 Resumen normativas internacionales establecidas para calidad de suelos. Modificado de Aliaga (2016).

Elemento	Alemania <sup>1</sup>	Brasil (Sao Paulo)	Canadá	Holanda
	[ppm]			
		VI/Uso Agrícola <sup>2</sup>	Uso Agrícola	VI <sup>2</sup>
<b>As</b>	20	35	12	55
<b>Co</b>	-	35	35	240
<b>Cr<sup>total</sup></b>	100	150	64	380
<b>Cu</b>	100	200	63	190
<b>Mo</b>	-	50	15	200
<b>Ni</b>	70	70	50	210
<b>Pb</b>	100	180	70	530
<b>Sb</b>	-	-	20	15
<b>V</b>	-	-	130	250
<b>Zn</b>	200	450	200	720

<sup>1</sup> Se hizo uso de los valores más altos para cada elemento, no tomando en consideración el tipo de suelo.

<sup>2</sup> Valor de intervención: Nivel sobre el cual las propiedades funcionales del suelo para plantas y animales se encontrarían seriamente deterioradas.

## Arsénico

El 6,98% de las concentraciones mayores superan el límite establecido por normas establecida por la norma de Canadá. El contenido total de arsénico es un mal indicador de la biodisponibilidad y del potencial riesgo para los organismos vivos (Taggart et al., 2004).

Novoa-Muñoz et al. (2007) realizó una extracción secuencial de arsénico para el estudio de la distribución de dicho elemento en suelos destinados a plantación de vid en Galicia, España, en el que concluyó que la mayor fracción retenida de arsénico corresponde a componentes asociado a hierro y aluminio. Sin embargo, modificaciones en el uso de suelos debido a actividades relacionadas con la agricultura como son la removilización de la materia orgánica, adición de funguicidas y excesos de fertilización de compuestos a base de fosforo llevarían a un potencial aumento de arsénico biodisponible.

## Cobalto

El 9,30% de las concentraciones mayores superan el límite establecido por las normas de Sao Paulo (Brasil) y Canadá, respectivamente.

Alloway et al. (2013) establece que la ocurrencia de cuadros de contaminación por cobalto en suelos es de baja ocurrencia, y que incluso, la toxicidad es aún más improbable.

## **Cromo**

El 6,98%, 23,26% y 76,74 de las concentraciones mayores superan el límite establecido por las normas de Sao Paulo (Brasil), Alemania y Canadá, respectivamente.

El cromo corresponde al único elemento del cual las concentraciones reportadas según las distintas legislaciones estudiadas se encuentran según concentración total, por lo tanto, los resultados desplegados anteriormente representan un acercamiento más fidedigno del potencial peligro asociado a dicho elemento.

## **Cobre**

El 2.36% de las concentraciones mayores superan el límite establecido por la norma de Canadá.

El potencial ambiental de la toxicidad de cobre radica en el tiempo de residencia de este. Bowen (1980) estimó para suelos de clima templado, que el tiempo de residencia varía entre 1000 a 1500 años, indicando que la remoción total de este elemento es algo improbable. Esto último, y junto con el hecho de que extensivo empleo de compuestos en base a cobre en la agricultura, serian potencial fuente de concentraciones anómalas de aquel elemento (Salminen et al., 2005).

## **Vanadio**

El 23,36% y 93,02% de las concentraciones mayores superan los límites establecidos por las normas de Holanda y Canadá, respectivamente.

El vanadio es considerado un elemento potencialmente riesgoso para el medio ambiente, sin embargo, existen contraindicaciones a lo anterior debido a la falta de evidencias con respecto a deficiencias o por concentraciones sobre lo permitido (Alloway et al., 2013).

## **Níquel**

El 2,33% de las concentraciones mayores superan el límite establecido por las normas de Alemania y Sao Paulo (Brasil), además el 4,65% de las concentraciones mayores superan el límite establecido por la norma de Canadá.

## **Zinc**

El 6,98% de las concentraciones mayores superan el límite establecido por las normas de Alemania, Canadá.

## **Molibdeno, plomo y antimonio**

Las concentraciones obtenidas para dichos elementos no superan en ningún caso los valores definidos en normas y estudios contrastados.

## 6 Conclusiones

El rendimiento y la calidad de la vid, y por consiguiente, las propiedades organolépticas del vino, se encuentran determinados por el *terroir*, en el cual influyen las múltiples interacciones entre parámetros naturales y antropogénicos. Entre los parámetros naturales se destaca el clima y las características físico-químicas del suelo. En lo que respecta a las propiedades físico-químicas de este, en particular, a las propiedades físicas, podemos mencionar la textura, permeabilidad y color del suelo, como también la geomorfología, que involucra conceptos como la pendiente y el aspecto. Las propiedades químicas por su parte, se encuentran influenciadas en gran medida por la geología de la roca madre.

En primer lugar, la metodología empleada en este trabajo, se basó en el procesamiento matemático-estadístico de la totalidad de la base de datos, obteniendo como resultado la caracterización y distribución espacial de los elementos químicos, mediante el cálculo de estadígrafos y el empleo de histogramas, *box plots* y *raster* de interpolación, respectivamente. Como también, la determinación de la proveniencia de los elementos químicos mediante el empleo del factor de enriquecimiento.

En segundo lugar, la metodología utilizada se basó en la aplicación de herramientas de estadística multivariable, que consideró la utilización de herramientas como análisis de correlación múltiple, análisis de componentes principales y análisis factorial.

En tercer lugar y final, la metodología se basó en la evaluación y comparación de aquellos elementos que presenten un riesgo para la calidad y sanidad medio-ambiental de suelos.

Los principales resultados del presente estudio muestran que gran parte de elementos mayores y trazas presentaron concentraciones y distribución espaciales influenciadas en gran medida por procesos litogénicos/pedogénicos.

En particular, elementos asociados a series máficas, correspondientes a elementos mayores como Fe y Ti, y elementos trazas como Co, Mn y V presentaron una concentración y distribución espacial coincidente con el emplazamiento de la unidad San Antonio, específicamente, a la sub-unidad Ortogneis, dicha unidad presenta mineralogía máfica como biotita y hornblenda, cuya meteorización explicaría a la concentración y distribución de los elementos en cuestión.

Por otro lado, elementos asociados a rocas calcáreas, correspondientes a elementos mayores como Ca y Mg, y elementos trazas como el Sr presentaron una concentración y distribución espacial coincidente con el emplazamiento de la sub-unidades Coquinas y Conglomerados y areniscas, pertenecientes a la Secuencia Sedimentaria Malvilla. La meteorización de minerales calcáreos como calcita y dolomita presentes en las litologías mencionadas proveería de elementos como Ca, Mg y Sr a los suelos suprayacentes. La concentración y distribución del elemento Na en los suelos de la zona de estudio, al igual que los

elementos mencionados anteriormente, respondería a procesos litogénicos-pedogénicos asociados a la Secuencia Sedimentaria Malvilla, la cual se encuentra correlacionada a la formación Navidad, esta última depositada en un ambiente marino.

El calcio exhibió diferencias significativas en lo que respecta a la concentración máxima presente en la zona de estudio (2,92 wt%) en comparación con el 41% de CaO reportado para niveles de coquinas pertenecientes a la Secuencia Sedimentaria Malvilla. Dicha diferencia se basaría en la diferencia de altura entre la zona de plantación y el nivel base local, lo cual provocaría una amplia variación del nivel freático, favoreciendo de esta a forma, a un mayor escape de cationes hacia cursos de aguas aledaños que se encuentran en equilibrio con el nivel base local.

La zona de plantación de viñedo coincide con la zona de menor concentración de calcio. Estudios afirman que elementos como Ca, Mg y P se encontrarían enriquecidos en la cepa Pinot noir. Lo anterior, recomendaría realizar un plan de fertilización y mantenimiento de calcio en los suelos destinados a plantación para un crecimiento óptimo del viñedo. Un análisis análogo podría ser realizado para los elementos magnesio y fósforo, pero su distribución no muestra una señal tan evidente de contraste entre la zona de plantación y el resto de la zona de estudio como para el caso del calcio.

Los resultados obtenidos mediante el empleo del factor de enriquecimiento muestran que el arsénico (As) y antimonio (Sb) poseen una fuerte contribución antrópica, sin embargo, dichos resultados son altamente cuestionables debido al hecho de llevar a cabo la normalización con respecto a un valor promedio puntual, ya que no toma en consideración los siguientes puntos:

- (1) La composición heterogénea de la corteza terrestre, por lo tanto, tomar un valor puntual no es representativo.
- (2) Procesos naturales de fraccionamiento que ocurren en las cercanías de la superficie
- (3) La solubilidad diferencial de los minerales con respecto a la digestión química utilizada para distintos estudios
- (4) La importancia de los procesos biogeoquímicos para la distribución de las concentraciones de los elementos

Otro punto de vital importancia, es el hecho de que los valores empleados en este estudio, presentes en la compilación realizada por Taylor & McLennan (2009), no reflejan la geoquímica del área de estudio, ya que como se ha expuesto anteriormente, la composición química de los suelos se encuentra influenciada principalmente por el material parental.

Se recomienda la utilización de valores de referencia definidos en base a las formaciones geológicas presentes en la zona de estudio, las cuales corresponden a la formación Navidad y a los intrusivos del Triásico-Jurásico. No obstante, ante la ausencia de valores representativos del fondo geoquímico de la zona de estudio se debió recurrir a la utilización de la compilación mencionada anteriormente.

Por lo anteriormente mencionado, es que se recomienda no hacer un uso indiscriminado del factor de enriquecimiento por si solo. Los resultados obtenidos mediante dicha herramienta deber ser añadidos a un análisis integral que considere herramientas univariable y multivariables.

Mediante la utilización de la estadística multivariable se obtuvieron ocho asociaciones geoquímicas. De las cuales, la primera asociación del factor 1 [Ti, Mn, Mo, Cu, Zn, Co, Th, Sb, V, La, Cr, W, Zr, Sn, Sc, Hf, Ta, Nb, Ga, In, REE, (Pb), (Ag), (Ni), (As), (U), (Bi) y (Cs)], la primera asociación del factor 2 [Ti, Mn y V, (Fe), (Mo), (Zn), (Co), (Cr), (Sn), (Ta) y (Nb)], y la asociación del factor 4 [Tl, (Ga), (In), (Rb), (Ce), (Th) y (Al)], se encontrarían asociados a proceso de tipo litogénicos/pedogénicos, relacionadas a procesos de meteorización y fraccionamiento del material heredado desde la unidad San Antonio, específicamente, a la sub-unidad Ortogneis.

La segunda asociación del factor 1 [-Na, -K, -Sr, (-Ca) y (-Rb)] y la primera asociación del factor 3 [Ca, Mg, Ni, Cr y Sc y (Ga)] se encuentran íntimamente asociados a procesos de tipo litogénicos/pedogénicos, relacionados a procesos de meteorización y fraccionamiento del material heredado proveniente de la Secuencia Sedimentaria Malvilla.

Por otra parte, la segunda asociación del factor 3 [-K, -As, -Sb, -Ba, -W, -Zr, -Hf, -Cs, (-Pb), (-Li) y (-Rb) y (-Na) y la asociación geoquímica del factor 6 [-P, (-K) y (-Cu)] se encuentran asociados a procesos que presentarían una contribución antrópica.

El antimonio y arsénico, corresponden a los elementos que presentaron el mayor factor de carga en lo que respecta a la segunda asociación del factor 3 (-0,667 y -0,601, respectivamente). Además de corresponder a los elementos que poseen la mayor contribución antrópica según el factor de enriquecimiento. Sus niveles máximos de concentración coincidieron con el emplazamiento de la las zonas de plantación de vid. Dicha distribución sería el resultado por la intervención del suelo desarrollado in situ y la manipulación mediante la adición de pesticidas, funguicidas y fertilizantes que provocarían el aumento en la concentración de los elementos en cuestión, aunque no se descartan otras fuentes posibles de origen antropogénico, por lo cual se recomiendan la realización de estudios más acabados con respecto al punto mencionado anteriormente.

La asociación geoquímica del factor 6 [-P, (-K) y (-Cu)], al igual que la asociación mencionada anteriormente, sus niveles máximos de concentración coincidieron con el emplazamiento de la las zonas de plantación de vid. La cual se explicaría a la intervención antrópica de los suelos, mediante la utilización de pesticidas, funguicidas y fertilizantes (para el aumento de macroelementos como P Y K), lo cual llevaría a un aumento de la concentración de cobre.

Lo anteriormente expuesto valida la utilización de la geoquímica multielemento como herramienta discriminadora de origen natural geológico (litogénico y/o pedogénico) de suelos y/o con contribución antrópica. No obstante, los alcances del presente estudio se encuentran acotados en lo que respecta a la discriminación entre procesos litogénicos y pedogénico, debido al hecho de no contar con muestras de geoquímica de roca pertenecientes a las litologías presentes en la zona de estudio. Se recomienda la realización de un levantamiento geoquímico litológico, como

también, de un levantamiento pedológico-geoquímico de los perfiles de suelo, con el objetivo de dilucidar la disyuntiva propuesta.

Sobre la comparación con normas y estudios internacionales, muestran que el arsénico, cobalto, cromo, cobre, níquel, vanadio y zinc presentaron concentraciones sobre el límite de las normas mencionadas. Sin embargo, es indispensable, destacar que, el presente estudio midió las concentraciones totales, por lo cual, no se tiene información con respecto a las concentraciones de las fases más disponibles (soluble e intercambiable). Por lo tanto, se recomienda la realización de estudios que consideren procesamiento de extracción secuencial, para una evaluación de mayor precisión con respecto al riesgo asociado a dichas concentraciones anómalas de química total presentes en los elementos químicos anteriormente mencionados.

## 7 Bibliografía

- Adriano, D. 2001.** Trace Elements in Terrestrial Enviroments. 2nd edition. NewYork, 867 p.
- Aliaga, G. 2016.** Caracterización geoquímica de los suelos en la cuenca de Rancagua (34°S-34°15'S y 70°30'O-71°O). Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. Memoria para optar al título de Geólogo, Departamento de Geología, Universidad de Chile. Santiago, 146 p.
- Alloway, B. (Editor). 2008.** Micronutrient Deficiencies in Global Crop Produccion. 1st edition, Springer, 369 p.
- Alloway, B. (Editor). 2013.** Heavy Metals in Soils. 3rd edition. Environmental Pollution Series, Springer, 615 p.
- Araya Vergara, J. F. 2000.** Desarrollo de las superficies de aplanamiento disectadas sobre coast range en la Región del Maule, Chile Central. Investigaciones Geográficas, 34. Santiago, Chile.
- Arellano P., Cortes E., Fuentes C., Genot A., Muñoz B., Saavedra C., Salinas S., Villela B. (2015).** Estudio Geoquímico de la Viña Malvilla, San Antonio, Quinta Región, Chile. Curso Geoquímica Aplicada, Departamento de Geología, Universidad de Chile. Santiago, 55 p.
- Arnon, D.I., Stout, P.R. 1939.** The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. *Plant Physiology*, 14: 371–375.
- Artaxo, P., Oyola, P., Martinez, R. 1999.** Aerosol composition and source apportionment in Santiago de Chile. *Nucl Instrum Methods Phys Re Sect B-Beam Interact Mater Atoms* 150:409–416.
- Barker, A.V., Pilbeam, D.J. 2007.** Introduction. In Barker, A.V., Pilbeam, D.J. (Eds.), *Handbook of Plant Nutrition*, CRC, Taylor & Francis, Boca Raton, FL, pp. 3–18.
- BBoSchG (Bundes-Bodenschutzgesetz). 1998.** Act on Protection against harmful changes to Soil and on Rehabilitation of Contaminated Sites. (Federal Soil Protection Law) 17.3.1998, *Bundes-Gesetz-Blatt (Federal Law Gazette)*, I, 502, 1998.
- Borgel J. 1983.** Geomorfología y Geografía de Chile. Instituto Geográfico Militar. Vol. 2. Santiago, 373 p.
- Bowen, H. 1980.** Environmental chemistry of the elements. Academic Press. New York. 333.
- Castillo, P. 2017.** Biogeochemichal association of soil and nutrients in cv. Carmenere and Pinot Noir berries: Applied study in four vineyards of centran Chile. OIV: Wine & Vine Congress. Sophia, Bulgaria, May – June 2017.

**Castillo, P., Contreras, M., Cortés E., López, S., Townley, B. 2015.** Análisis geoquímico de suelos derivados de granodioritas en los valles de Casablanca y Santa Cruz. XIV Congreso geológico chileno, La Serena, Chile, Octubre 2015.

**Castillo P., Contreras M., López S., Serra I., Townley, B. 2015.** Informe final de resultados, proyecto Corfo Innova-Consorcio I+D Vinos de Chile: Influencias geológicas, mineralógicas y geoquímicas del cultivo de la vid en Chile (P3). Confidencial.

**CCME (Canadian Council of Ministers of the Environment). 2007.** Canadian soil quality guidelines for the protection of the environmental and human health. Summary tables. Updated Sept, 2007. In: Canadian environmental quality guidelines, 1999.

**Centro de Ciencias del Clima y la Resiliencia (CR2). 2015.** Informe a la Nación. La megasequía 2010-2015: Una lección para el futuro, 26 p.

**CETESB (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental). 2005.** Decisão de Diretoria Nº 195-2005-E, de 23 de novembro de 2005. Dispõe sobre a aprovação dos Valores Orientadores para Sólidos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo – 2005, em substituição aos Valores Orientadores de 2001, e dá outras providências.

**Chester. R. & Stoner J. H. 1973.** Pb in particulates from the lower atmosphere of the eastern Atlantic. *Nature* 1973; 245:27– 8.

**Christensen, P., Kasimatis, A., Jensen F. 2001.** Síntomas de deficiencias de nutrientes en la uva. *Informaciones agronómicas* (42): 8-13.

**Cohen, D.R., Kelley, D.L., Anand, R., Coker, W.B. 2010.** Major advances in exploration geochemistry, 1998–2007. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 10, pp. 3–16.

**Contreras, M. 2016.** Estudio geológico, petrográfico y granulométrico del material parental de suelos vitivinícolas de la zona central de Chile. Memoria para optar al título de Geólogo. Departamento de Ciencias de la Tierra. Universidad de Concepción. Concepción, 250 p.

**Cosio, F., Negrón, M., Gastó, J., Villate, J. 2007.** Distritos y sitios de la provincia templada secoestival nubosa o Valparaíso: Sécano de la costa. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 7(1), 38 - 61 p.

**Covacevich, V., Frassinetti, D. 1986.** El género *Cancellaria* en el Mioceno de Chile, con descripción de cuatro especies nuevas (Gastropoda: Cancellariidae). *Revista Geológica de Chile*, Nos. 28-29, p. 33- 67.

**Covacevich, V., Frassinetti, D. 1990.** La fauna de Lo Abarca, Hito biocronoestratigráfico y paleoclimático en el Terciario Superior marino de Chile Central. In simposio sobre el Terciario de Chile, No. 2, Actas, p. 51-71. Concepción.

- Dongarra, G., Manno, E., Varrica, D., Vultaggio, M. 2007.** Mass levels, cristal component and trace elements in PM10 in Palermo, Italy. *Atmospheric Environment*, 41, 7977–7986.
- Epstein, E. 1965.** Mineral metabolism. In Bonner, J., Varner, J.E. (Eds.), *Plant Biochemistry*, Academic, London, pp. 438–486.
- Farías, M. 2007.** Tectónica y erosión en la evolución del relieve de los Andes de Chile Central durante el Neógeno.
- Fiket, Z., Mikac, N., Kniewald, G. 2011.** Arsenic and other trace elements in wines of eastern Croatia. *Food Chemistry* 126: 941-947.
- Filzmoser, P., Croux, C. 2003.** Dimension reduction of the explanatory variables in multiple linear regression. *Pliska Stud. Math. Bulgar.*, Vol. 14, pp. 59-70.
- Foy, C. D., Chaney, R. L., and White, M. C. 1978.** The physiology of metal toxicity in plants, *Annu. Rev. Physiol.*, 29, 511.
- Gajardo, R. 1994.** La Vegetación Natural de Chile. Clasificación y Distribución Geográfica. Editorial Universitaria.
- Gana, P. Tosdal, R. 1996.** Geocronología U-Pb y K-Ar en intrusivos del Paleozoico y Mesozoico de la Cordillera de la Costa, Región de Valparaíso, Chile. *Revista Geológica de Chile*. No. 23, Vol, 1, p. 151-164.
- Gana, P. Wall, R., Gutiérrez, A. 1996.** Mapa Geológico del área de Valparaíso-Curacaví. Regiones de Valparaíso y Metropolitana, Mapa no. 1, Escala 1: 100.000, SERNAGEOMIN, Santiago, Chile, 20 p.
- Gaspar, L.** Fertilización del cultivo de la vid. [en línea] [www.agroestrategias.com/pdf/Cultivos%20-%20Fertilizacion%20de%20la%20Vid.pdf](http://www.agroestrategias.com/pdf/Cultivos%20-%20Fertilizacion%20de%20la%20Vid.pdf) [consulta: 29 de Mayo 2018].
- Hoffmann A. 2012.** Flora silvestre de Chile, zona central, Quinta edición. Ediciones Fundación Claudio Gay, Santiago, 254 p.
- Hubbert, M.K., 1940.** The Theory of Groundwater Motion. *J. Geol.*, 48(8) pp.785-944.
- Huggett, J.M. 2005.** Geology and wine: a review. *Proceedings of the Geologist's Association*, 117, 239 – 247 p.
- Instituto de Asuntos Públicos. 2016.** Informe País: Estado del Medioambiente en Chile 2016. Universidad de Chile. Santiago, 604 p.
- Ivchenko, V. I. 1988.** Molybdenum in metabolism of plants in Proc. Int. Symp. New results in the Research of Hardly Known Trace Elements and their Role in Food Chain, Pais, I., Ed., University of Horticulture and Food Industry, Budapest, 51.

**Jenny H. 1941.** Soil Forming Factors. A system of quantitative pedology. McGraw-Hill, New York, 281 p.

**Kabata-Pendas, A. 2001.** Trace elements in soils and plants. 3rd Ed. Boca Raton, London, New York, CRC Press. 403 p.

**Kabata-Pendías, A. 2011.** Trace elements in soils. 4rd Ed. Boca Raton, London, New York, CRC Press. 467 p.

**Kment, P., Mihaljevič, M., Ettler, V., Šebek, O., Strnad, L., & Rohlova, L. 2005.** Differentiation of Czech wines using multielement composition – A comparison with vineyard soil. *Food Chemistry*, 91, 157–165.

**Lagos, F. 2015.** Geomorfología del Terroir en Malvilla y Tapihue, Región de Valparaíso, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo, Departamento de Geología, Universidad de Chile. Santiago, 78 p.

**Lara, R., Cerutti, S., Salonia, J. A., Olsina, R. A., & Martinez, L. D. 2005.** Trace element determination of Argentine wines using ETAAS and USN-ICP-OES. *Food and Chemical Toxicology*, 43, 293–297.

**Larcher, R.; Nicolini, G. 2008.** Elements and inorganic anions in winemaking: Analysis and applications, In *Hyphenated techniques in grape and wine chemistry* (Flamini, R., editor) John Wiley & Sons: 289-333, Chichester.

**Lin, Z.Q., Barthakur, N.N., Schuepp, P.H., Kennedy, G.G. 1995.** Uptake and translocation of <sup>54</sup>Mn and <sup>65</sup>Zn applied on foliage and bark surfaces of balsam fir [*Abies balsamea* (L.) Mill.] seedlings. *Environ. Exp. Bot.* 35, 475–483.

**Loska, K., Cebula, J., Pelczar, J., Wiechula, D., Kwapilinski, J. 1997.** Use of enrichment and contamination factors together with geoaccumulation indexes to evaluate the content of Cd, Cu, and Ni in the Rybnik water reservoir in Poland. *Water, Air, and Soil Pollution* 1997; 93:347–65.

**Luzio, W. 1972.** Pedogénesis de la toposecuencia Lo Vásquez – Las Rosas. *Agricultura técnica* – Vol. 32 – N° 2.

**Marschner H. 1995.** Mineral nutrition of higher plants. Segunda edición. Academic Press: 899 pp., London.

**Mertz, W. 1969.** Chromium occurrence and function in biological systems, *Physiol. Rev.*, 49, 163.

**Mihaljevič, M.; Ettler, V.; Šebek, O.; Strnad, L.; Chrastny, V. 2006.** Lead isotopics signatures of wine and vineyard soils – tracers or lead origin. *Journal of geochemical exploration*, 88, 130-133.

**MINSEGPRES. 1994.** Ley 19300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente. Ministerio Secretaria General de la Presidencia de la República, Santiago de Chile, 1 de marzo de 1994.

**MMA. 2011.** Informe del Estado del Medio Ambiente 2011.

**Moreno, T. 2010.** Variations in vanadium, nickel and lanthanoid element concentrations in urban air. *Science of The Total Environment*. Vol 408, Issue 20, Pages 4569–4579.

**Nahrwold, H. 2014.** *Vinos de Chile*, Segunda edición. Ed. Contrapunto, Santiago, 284 p.

**Nóvoa-Muñoz, J.; Queijeiro, J.; Blanco-Ward, D.; Álvarez-Olleros, C.; García Rodeja, E.; Martínez-Cortizas, A. 2007.** Arsenic fractionation in agricultural acid soils from NW Spain using a sequential extraction procedure. *Science of the Total Environment*, 378, 18–22.

**Nriagu, J.O. 1978.** *The Biogeochemistry of Pb in the Environment: Part A*. Elsevier, Amsterdam. 422 p.

**Paskoff, R. 1970.** *Le Chili Semi-Aride*. Traducción de Novoa Jose, 1993 "Geomorfología de Chile semiárido". Universidad de la Serena.

**Poblete, J.; Luca, R.; Soto, C.; Santelices, R.; Lopez, L.; Guzmán, C.; Townley, B.; Peña, A. 2007.** Geochemical and mineralogical soil study of the Veramonte vineyard, Casablanca Valley, central coastal Chile. 23rd International Applied Geochemistry Symposium, Oviedo.

**Pohl, P. 2007.** What do metals tell us about wine? *Trends in Analytical Chemistry*, 26(9), 941–949.

**Reimann, C. & de Caritat, P. 1998.** *Chemical Elements in the Environment*. Factsheets for the Geochemist and Environmental Scientist. Springer, Berlin.

**Reimann, C. & de Caritat, P. 2000.** Intrinsic flaws of element enrichment factors (EFs) in environmental geochemistry. *Environmental Science & Technology*, 34, 5084-5091.

**Reimann, C. & de Caritat, P. 2005.** Distinguishing between natural and anthropogenic sources for elements in the environment: regional geochemical surveys versus enrichment factors. *Science of the Total Environment*, 337, 91-107.

**Reimann, C., Filzmoser, P., Garrett, R. 2002.** Factor analysis applied to regional geochemical data: problems and possibilities. *Applied Geochemistry*, Vol 17, pp 185-206.

**Reimann, C., Filzmoser, P., Garret, R., Dutter, R. 2008.** *Statistical data analysis explained: Applied environmental statistics with R*. John Wiley & Sons, Ltd, 343 p.

**Reimann, C., Matschuillat, J., Birke, M., Salminen, R. 2010.** Antimony in the environment: Lessons from geochemical mapping. *Applied Geochemistry* 25: 175-198.

**Reisenauer, H. M., Walsh, L. M., and Hoefft, R. G. 1973.** Testing soil for sulphur, boron, molybdenum, and chlorine, in *Soil Testing and Plant Analysis*, Walsh, L. M. and Beaton, J. D., Eds., Soil Science Society of America, Madison, WI, 173.

**Rodríguez, M. 2008.** Evolución de la erosión y del relieve del antearco de Chile central (33-34°S) durante el neógeno mediante el análisis de minerales pesados detríticos y la geomorfología. Tesis para optar al grado de magíster en ciencias mención geología. Departamento de Geología, Facultad de ciencias físicas y matemáticas, Universidad de Chile. 40 p.

**Rudnick R., Gaos S. 2003.** Composition of the Continental Crust in *Treatise on Geochemistry*, Volume I, Meteorites, Comets and Planets (eds. Holland H., and Turekian K.). Elsevier.

**Rule, J. H. 1999.** Trace metal cation adsorption in soils: selective chemical extractions and biological availability, in *Adsorption and its Applications in Industry and Environmental Protection*, Dałbrowski, A., Ed., Elsevier, Amsterdam, 319.

**Salma, I., Maenhaut, W. 2005.** Changes in elemental composition and mass of atmospheric aerosol pollution between 1996 and 2002 in a Central European city. *Environ Pollut*; 143:479–488.

**Salminen, R. (Chief-Ed.), Batista, M. J., Bidovec, M. Demetriades, A., De Vivo. B., De Vos, W., Duris, M., Gilucis, A., Gregorauskiene, V., Halamic, J., Heitzmann, P., Lima, A. 2005.** *Geochemical Atlas of Europe*. Geological Survey of Finland, Espoo, Finland.

**Sepúlveda, O. 2003.** Sectorización climático-habitacional de las regiones de Valparaíso y Metropolitana. *Revista invi* N° 46, volumen 18.

**SERNAGEOMIN. 2003.** Mapa Geológico de Chile: versión digital, escala 1:1.000.000. *Servicio Nacional de Geología y Minería*, Publicación Geológica Digital, N°4 (CD-ROM, versión 1.0, 2003). Santiago.

**Servicio Agrícola y Ganadero. 2016.** Informe Ejecutivo: Producción de Vinos 2016. Ministerio de agricultura. Santiago, 9 p.

**Taggart MA, Carlisle M, Pain DJ, Williams R, Osborn D, Joyson A, Meharg AA. 2004.** The distribution of arsenic in soil affected by the Aznalcóllarmine spill, SWSpain. *Sci Total Environ*; 323:137–52.

**Tavera, J. 1979.** Estratigrafía y paleontología de la Formación Navidad, Provincia de Colchagua, Chile. *Boletín del Museo de Historia Natural* 36, 176 p.

**Taylor S. R. & McLennan S. M. 2009.** *Planetary Crusts: Their Composition and Evolution*. Cambridge University Press, Cambridge. 378 p.

**Tukey, J. W. 1977.** *Exploratory data analysis*, Addison-Wesley: Reading, Mass.

- Valdés, A. 2013.** Geochemical features of aerosols in Santiago de Chile from time series analysis. *Environmental Earth Sciences*, 69, 2073–2090.
- Vaudour, E. 2002.** The quality of grapes and wine in relation to geography: notions of Terroir at various scales. *Journal of Wine Research* 13 (2), 117-141.
- Vaudour, E.; Shaw, A.B. 2005.** A worldwide perspective on viticultural zoning. *South African of Enology and Viticulture* 26-2: 106-115.
- Venegas, G. A., V. Loewe, González, M. 2013.** Influencia el crecimiento en longitud y diámetro debrotes sobre la floración de *Pinus pinea* L. *Quebracho (Santiago del Estero)* vol.21 no.1.
- VROM (Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment). 2000.** Streefwaarden en interventiewaarden bodemsanering (Target values and intervention values for soil remediation). *Government Gazette* No. 39, 24 February 2000.
- Wall, R., Gana, P., Gutiérrez, A. 1996.** Mapa Geológico del área de San Antonio-Melipilla. Regiones de Valparaíso, Metropolitana y del Libertador General Bernardo O'Higgins, Mapa no 2, escala 1:100.000, SERNAGEOMIN, Chile.
- Welch, R.M., Graham, R.D. 2005.** Agriculture: The real nexus for enhancing bioavailable micronutrients in food crops. *J. Trace Elem. Med. Biol.*, 18: 299–307.
- White, W. 2013.** *Geochemistry*. 1st edition, Wiley-Blackwell, 668 p.
- Wild, A., Jones, L.H.P.1988.** Mineral nutrition of crop plants. In Wild, A. (Ed.), *Russell's Soil Conditions and Plant Growth* (11th Edn.), Longman, Harlow, UK.
- Zoller, W. H., Gladney, E. S., Duce, R. A. 1974.** Atmospheric concentrations and sources of trace metals at the South Pole. *Science* 1974; 183:199– 201.

# ANEXOS

## A Error Analítico

Elemento	Error Analítico
Mo	4,64
Cu	2,29
Pb	2,23
Zn	1,81
Ag	8,46
Ni	1,86
Co	2,27
Mn	1,90
Fe	0,78
As	4,74
U	2,20
Th	2,25
Sr	0,88
Cd	22,10
Sb	1,89
Bi	5,27
V	0,87
Ca	0,97
P	3,61
La	2,58
Cr	3,80
Mg	0,89
Ba	1,65
Ti	1,57
Al	0,90
Na	1,01
K	1,15
W	7,58
Zr	1,00
Sn	4,30
Be	37,24
Sc	1,74
Y	0,84
Ce	2,62
Pr	1,56
Nd	2,00
Sm	5,21
Eu	5,44
Gd	4,27

Tb	5,93
Dy	2,88
Ho	5,95
Er	3,88
Tm	8,10
Yb	4,64
Lu	12,71
Hf	2,31
Li	3,12
Rb	1,03
Ta	2,65
Nb	1,80
Cs	1,92
Ga	1,62
In	13,13
Se	13,36
Te	17,79
Tl	3,92

## B Base de datos

Muestra	Mo	Cu	Pb	Zn	Ag	Ni	Co	Mn	Fe	As	U	Th	Sr	Cd	Sb	Bi	V
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppb	ppm	ppm	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
1,1	0,85	35,4	15,07	86,3	50	19,3	21,2	1414	6,35	8,3	1,4	6	325	0,1	1,04	0,22	220
1,2	0,68	63,7	12,03	89,7	60	95,4	28,8	1219	6,14	6,5	1	5,7	304	0,07	0,58	0,16	183
1,3	0,58	38,2	11,73	74,7	59	30,2	19,7	1304	5,46	6,8	1,2	7,1	290	0,13	0,7	0,12	179
1,5	1,12	50,4	14,33	107,9	65	20,4	19,9	1315	5,72	9,2	1,5	7,2	304	0,17	1,14	0,16	198
1,6	0,94	33,8	16,73	66,4	41	14,8	16,9	1658	4,86	7,8	1,2	5,8	323	0,11	1,08	0,15	169
2,1	0,59	39,1	13,5	68,7	41	26,3	20,6	1415	4,64	6,5	1,2	5,7	316	0,09	0,76	0,11	153
2,2	0,69	37,5	12,14	81,6	36	52,8	26,1	1582	5,78	5,8	1,1	5,8	334	0,09	0,67	0,08	194
2,3	0,84	34,7	18,51	101	48	31	27,9	1513	7,75	9,5	1,2	5,7	303	0,14	0,85	0,1	283
2,4	0,59	36,1	14,14	67,2	31	20,1	18,8	1207	5,51	7,8	1,3	6,5	372	0,1	0,76	0,11	181
2,5	0,69	48	16,79	68,9	72	25,5	27,2	1774	6,36	14,2	1,4	6,6	226	0,2	1,16	0,16	215
2,6	0,84	49	14,36	94,4	45	20,7	15,8	1400	5,96	10,2	1,4	7,3	265	0,08	1,01	0,14	195
2,7	1,45	42,4	16,02	206,8	67	39,7	37,8	2533	14,23	9,7	2,1	7,9	235	0,14	1,08	0,14	599
2,8	0,72	29,7	12,9	60,7	86	18,1	17,7	1166	5,23	7,8	1,3	6,1	307	0,07	0,87	0,1	188
3,1	0,41	30,9	12,22	68,7	28	33,3	17,4	1199	4,7	4,8	1,2	6,7	318	0,15	0,51	0,1	144
3,2	0,56	34,6	14,36	62,6	40	35	20,2	1157	4,96	5,9	1,5	7,6	333	0,09	0,65	0,1	159
3,3	0,85	37,5	14,93	90,4	63	21,4	19,1	1491	5,92	10,9	1,3	6	308	0,08	0,95	0,13	200
3,4	0,65	42,1	13,37	74,1	42	24,4	23,3	1490	5,32	7,9	1,3	5,6	318	0,09	0,77	0,12	187
3,5	0,8	43,6	16,02	75,9	59	21,5	16,5	1424	4,97	10,7	1,5	6,1	288	0,11	1,08	0,12	170
3,6	0,79	51,2	15,12	77,1	24	22,1	16,2	1006	5,44	10,5	1,5	5,6	258	0,1	0,95	0,12	171
3,7	0,89	43,3	13,87	98,3	54	24,2	21,1	1760	7,18	11	1,4	6	286	0,11	1,2	0,13	269
3,8	1,35	41,9	15,16	188,7	57	38,9	40,9	2640	13,12	9,4	1,8	7	263	0,14	1,14	0,14	583
3,9	0,99	37,4	15,01	97,8	48	22,7	22,4	1770	7,88	10,7	1,9	6,8	276	0,13	1,15	0,14	314
3,1	0,79	34,5	12,96	75,2	34	25,7	21,4	1343	5,77	7,5	1,2	6	318	0,1	0,67	0,09	189
4,1	0,56	32,2	12,39	63,6	22	26,3	14,6	1092	4,58	6,9	1,2	5,4	338	0,11	0,62	0,1	149
4,2	0,6	27,4	14,45	50,3	44	13,2	14,4	888	3,9	7,1	1	4,6	310	0,12	0,73	0,08	124
4,3	0,78	40,3	13,39	105,1	66	24,5	19,9	1269	5,93	8,2	1,1	4,3	358	0,11	0,92	0,11	195
4,4	0,59	38,1	15,29	67,7	51	22	22,1	1527	5,67	12,4	1,5	7,2	260	0,11	0,99	0,14	186
4,5	0,77	39,6	13,46	75,9	35	19,2	14,6	1006	5,09	11,2	1,5	7,2	286	0,06	0,94	0,1	166
4,6	0,73	40,1	13,96	69,8	40	14,9	15,1	1157	5,03	10,3	3,4	7	301	0,31	1,09	0,13	173
4,7	1,11	47,6	17,09	138,5	38	20,7	23,5	1651	7,44	9,7	1,8	7,8	278	0,16	1,12	0,13	262
4,8	1,36	40,8	15,35	146,2	44	27	29,6	2115	10,71	9,2	1,6	6,2	281	0,13	1,04	0,12	471
4,9	0,63	31,5	13,29	73,9	33	28,5	20,5	1372	5,17	7,8	1,1	4,6	342	0,12	0,77	0,09	186
4,1	0,66	43,7	14,05	103,7	35	16,3	18,1	897	6,94	6,4	2	9,2	267	0,06	0,4	0,13	187
5,1	0,65	32,1	15,09	57	49	18,8	15,2	847	4,1	6,3	1,3	7,7	318	0,09	0,6	0,14	129
5,2	0,49	34	14,34	65,4	<20	26,6	15,4	1065	3,95	4,9	1	5,8	315	0,17	0,55	0,14	125
5,3	0,78	40,6	15,58	72,1	55	21	20,9	1564	4,48	7,1	1,3	6,1	347	0,19	0,93	0,13	151
5,4	0,83	38,9	17,21	58,4	33	15,3	20,5	1090	4,98	7,7	1,6	7,2	342	0,07	0,88	0,15	174
5,5	0,65	26,6	14,52	51,9	48	16,4	12,7	1122	3,68	6,2	1,3	7,1	358	0,12	0,78	0,13	140
5,6	0,7	46,5	14,17	73,4	64	38,6	21,4	954	4,74	13	1,3	6,4	292	0,13	0,91	0,1	164
5,7	0,99	43	15,94	103,7	65	15,2	18	1062	6,32	11,1	1,4	6,9	288	0,13	1,03	0,12	221
5,8	1,37	38,4	15,79	151,1	64	28,3	31,7	2075	9,77	9	1,5	6,2	280	0,15	0,99	0,14	421
5,9	1,62	44,8	15,31	267,7	68	47	44,8	2754	15,99	9,9	1,5	5,6	247	0,14	1,19	0,15	698
5,1	1,68	41,9	15,16	251,5	68	46,8	43,7	2873	16,2	9,8	1,7	14,5	250	0,12	1,18	0,15	674

Muestra	Ca	P	La	Cr	Mg	Ba	Ti	Al	Na	K	W	Zr	Sn	Be	Sc	S	Y
	%	%	ppm	ppm	%	ppm	%	%	%	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	%	ppm
1,1	1,59	0,025	28,8	76	0,44	370	1,082	7,36	2,282	0,93	0,8	84,3	1,9	1	17,7	<0,04	29,2
1,2	2,77	0,063	30,3	172	1,86	277	0,843	7,59	1,236	0,44	0,4	48,7	1,5	1	24,7	<0,04	32,3
1,3	2,34	0,029	27,7	89	1	371	0,85	7,02	1,87	0,89	0,7	55,6	1,6	2	21,7	<0,04	28,7
1,5	1,76	0,219	32,4	72	0,49	440	1,123	6,77	2,083	1,22	0,8	76	1,5	2	14,8	<0,04	28,8
1,6	2,05	0,03	23,7	65	0,46	369	1,093	6,28	2,071	0,88	0,7	61,4	1,7	1	13,7	<0,04	21,5
2,1	2,09	0,034	24,7	74	0,68	416	0,736	7,19	2,178	1,02	0,7	62	1,7	2	16,4	<0,04	24,5
2,2	2,92	0,044	23,1	134	1,41	347	0,965	6,76	1,896	0,7	0,6	54	1,5	<1	21,2	<0,04	23,7
2,3	2,08	0,035	26,2	108	0,82	313	1,185	6,99	1,86	0,72	0,6	62,1	2,1	2	17,6	<0,04	23,6
2,4	2,48	0,027	29,3	77	0,82	287	1,008	7,3	2,054	0,57	0,6	55,5	1,8	1	18,7	<0,04	29,3
2,5	1,71	0,024	27	73	0,69	696	0,871	7,79	1,391	0,71	0,9	91,2	2	<1	16,7	<0,04	30,8
2,6	1,61	0,053	33,9	66	0,49	608	1,015	7,02	1,818	1,02	1	78,2	1,8	2	16	<0,04	34,6
2,7	1,62	0,035	32,7	149	0,56	297	2,202	6,21	1,416	0,56	1,1	86,9	2,5	2	27,2	<0,04	33,7
2,8	2,03	0,033	22,2	83	0,68	340	1,02	7,09	2,255	0,91	0,8	71,9	1,7	2	18,4	<0,04	21,5
3,1	2,9	0,065	21,8	88	1,09	335	0,74	6,75	1,907	0,85	0,4	42	1,6	1	19,4	<0,04	24
3,2	2,47	0,032	27,5	99	0,88	393	0,794	7,2	2,063	0,89	0,7	49,7	2	2	20,1	<0,04	27,4
3,3	1,59	0,043	29,2	64	0,52	436	0,933	7,22	2,084	0,98	0,8	73,8	1,6	2	16,6	<0,04	29,8
3,4	2,02	0,035	24,7	77	0,69	379	0,791	7,08	2,048	0,83	0,7	61,2	1,6	1	18,7	<0,04	24,2
3,5	1,57	0,044	29,2	60	0,41	588	0,857	6,85	2,095	1,01	0,9	73,4	1,7	1	14,4	<0,04	26,5
3,6	1,76	0,055	31,8	61	0,51	729	0,803	6,84	1,59	0,77	0,8	72,2	1,4	1	15,5	0,05	36,5
3,7	1,62	0,037	31,2	80	0,44	726	1,262	6,71	1,848	0,92	0,9	80,5	2	1	15,8	<0,04	31,2
3,8	1,54	0,035	31,6	146	0,58	343	2,04	6,64	1,618	0,63	0,9	95,2	2,7	<1	24,8	<0,04	30
3,9	1,61	0,038	27	101	0,43	314	1,481	6,87	1,96	0,82	1	84,1	2	2	18,1	<0,04	22,7
3,1	2,14	0,041	27,7	80	0,87	332	0,993	7,5	1,912	0,72	0,7	52,7	1,7	2	18,6	<0,04	23,2
4,1	2,33	0,035	21,5	75	0,65	353	0,709	7,08	1,944	0,8	0,6	49,4	1,5	<1	16,9	<0,04	22,9
4,2	1,64	0,028	20,8	46	0,43	401	0,631	6,89	2,343	1,09	0,6	64,5	1,3	1	12,2	<0,04	18,6
4,3	2,36	0,05	20	65	0,63	410	0,806	7,16	2,245	0,99	0,6	71,9	1,5	1	18,2	<0,04	21,9
4,4	1,73	0,02	26,7	65	0,65	575	0,844	7,14	1,603	0,73	0,8	74,4	1,6	2	14,9	<0,04	29
4,5	1,27	0,047	31,9	49	0,37	526	0,803	6,94	2,033	1,13	0,8	81	1,6	1	15	<0,04	27,7
4,6	1,83	0,078	23,2	71	0,42	368	0,944	6,47	2,014	0,9	0,7	71,4	1,6	1	13,9	<0,04	24
4,7	1,57	0,091	25,9	77	0,47	452	1,123	7,05	1,891	0,98	0,9	85,4	2,3	<1	16,6	<0,04	24,1
4,8	1,71	0,042	27,1	123	0,6	321	1,86	6,91	1,844	0,76	0,9	88,3	2,5	1	21	<0,04	24,5
4,9	2,46	0,048	19,8	86	0,9	353	0,859	7,11	2,17	0,78	0,6	56,8	1,5	1	17,6	<0,04	20,6
4,1	1,95	0,053	32,5	36	1,34	391	0,872	8,41	1,204	0,81	0,5	34,5	2,3	1	21,6	<0,04	27,1
5,1	1,92	0,042	31	54	0,54	356	0,619	7,33	1,769	0,87	0,6	49	1,5	2	14,7	<0,04	25,3
5,2	2,74	0,062	24,5	74	0,8	354	0,643	7,1	1,921	0,94	0,5	44	1,3	1	15,3	<0,04	23,4
5,3	2,01	0,036	25,6	54	0,48	419	0,736	7,36	2,356	1,04	0,6	68,5	1,6	<1	14,5	<0,04	26,8
5,4	1,89	0,028	32,2	63	0,44	353	0,834	7,58	2,255	0,87	0,9	61,9	1,7	2	15,9	<0,04	25
5,5	2,12	0,027	24,8	68	0,52	367	0,93	6,81	2,463	1,03	0,7	57,9	1,6	<1	15,4	<0,04	19,6
5,6	2	0,151	29	132	1,03	440	0,807	7,26	2,097	1,14	0,8	71,9	1,7	<1	17,6	<0,04	25
5,7	1,33	0,102	27,7	57	0,39	389	1	7,4	2,124	0,99	0,7	92,2	2	1	15,1	<0,04	25,4
5,8	1,54	0,047	26,2	100	0,49	337	1,773	7,01	1,751	0,76	0,9	89,8	2,6	1	19,8	<0,04	24,9
5,9	1,72	0,054	27,2	176	0,73	305	2,158	5,73	1,364	0,58	0,9	82	3	<1	25,5	<0,04	25,1
5,1	1,76	0,041	34,4	178	0,71	307	2,166	6,05	1,338	0,56	1,2	83,7	2,7	<1	29,8	<0,04	29,4

Muestra	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Li	Rb	Ta
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
1,1	56,27	7,9	31,5	6,1	2	6,3	1	4,8	1,1	2,9	0,4	2,6	0,4	2,36	15,4	41,3	0,6
1,2	60,13	8,6	36,4	7,2	2	6,6	1	5,7	1,2	3,4	0,4	3	0,5	1,4	14,4	24,9	0,5
1,3	58,35	7,5	30	6,6	1,7	5,7	0,9	4,9	1,1	2,8	0,4	2,9	0,4	1,71	14	53,8	0,6
1,5	61,91	8	31,9	6,4	1,8	6,7	0,8	4,7	1	2,5	0,4	2,5	0,4	2,05	16	56,6	0,7
1,6	50,87	6,2	25,8	5,3	1,5	4,7	0,7	4,2	0,8	2,2	0,3	2,2	0,3	1,92	12,1	41,6	0,7
2,1	52,53	6,6	27,3	5,4	1,8	5,2	0,8	4,7	0,8	2,8	0,4	2,2	0,3	1,86	12,6	45	0,5
2,2	53,85	6,3	27,5	5,9	1,3	5,5	0,7	4,4	0,9	2,4	0,4	2,4	0,3	1,63	11,8	35,6	0,6
2,3	60,96	7,2	27,1	5,5	1,6	5,3	0,8	4,5	0,8	2,7	0,4	2,4	0,3	2,04	11,5	38,5	0,7
2,4	60,16	8,4	35,7	7,9	2,2	7	1	5,3	1,1	2,9	0,4	2,5	0,4	1,74	14,2	25,1	0,6
2,5	64,15	7,4	30,6	6,2	1,8	5,8	0,9	5,5	1	3,2	0,5	3	0,4	2,53	21,3	39,4	0,6
2,6	55,14	8,4	35,6	7,8	2	6	0,9	5,8	1,2	3,1	0,5	3,3	0,4	2,29	15,6	60,9	0,7
2,7	62,67	8,6	35,3	7,2	1,8	7,4	1,1	5,8	1,3	3,1	0,5	2,8	0,5	2,74	12,3	26,2	0,9
2,8	45,89	6	24,7	5,1	1,5	5,1	0,6	4,1	0,8	2,3	0,3	2,2	0,3	2,14	14,2	35,5	0,6
3,1	48,84	6,2	27,8	5,9	1,3	5,2	0,8	5	0,8	2,6	0,4	2,2	0,4	1,48	10,1	39,3	0,5
3,2	57,46	7,7	31,4	6,5	1,7	5,2	0,8	4,7	1	2,9	0,4	2,4	0,4	1,55	13,2	42,7	0,6
3,3	50,32	7,6	30,2	6,4	1,7	6,4	0,8	5,2	1	2,9	0,4	2,4	0,4	2,21	14,4	48,4	0,5
3,4	51,85	6,8	27,8	5,8	1,5	5,4	0,7	4,4	0,9	2,5	0,4	2,4	0,3	1,91	11,7	42,3	0,5
3,5	54,15	7,4	29,2	5,8	1,7	5,3	0,7	4,8	0,9	2,6	0,3	2,1	0,4	2,09	17,7	47,9	0,6
3,6	52,59	8,6	36,8	7,4	2,1	7,8	1	5,7	1,2	3,6	0,4	2,9	0,4	2,14	16	40,8	0,5
3,7	58,89	7,7	30,8	6,7	1,7	6,4	0,8	4,9	1	2,8	0,4	2,9	0,4	2,25	15,6	47,9	0,7
3,8	68,94	8,4	32,7	6,6	1,7	6,2	0,9	5	1,1	3	0,4	2,7	0,4	2,75	13,1	29,2	0,9
3,9	55,44	7,1	28,7	5,5	1,4	5,2	0,8	4,6	0,8	2,5	0,3	2,2	0,4	2,41	15,5	37	0,8
3,1	59,08	7,4	28,3	5,9	1,6	5,2	0,8	4,1	0,8	2,2	0,3	2,1	0,3	1,58	12,8	37,1	0,6
4,1	42,5	6	23,3	5	1,3	4,6	0,6	4,1	0,8	2,4	0,4	2,2	0,3	1,53	11,7	47,2	0,5
4,2	41,49	5,2	21,3	4,3	1,3	3,4	0,5	3,5	0,7	1,8	0,3	1,7	0,3	2	12,9	43,6	0,4
4,3	42,6	5,4	23,1	5,1	1,4	4,8	0,7	3,7	0,9	2,3	0,4	1,8	0,4	2,04	13,5	46,2	0,4
4,4	55,69	6,9	30,2	6,3	1,6	5,6	0,8	4,4	1	2,8	0,4	2,3	0,4	2,17	17,7	40,1	0,6
4,5	54,64	8,3	33,7	6,3	1,7	5,9	0,8	4,8	1,1	2,6	0,5	2,2	0,3	2,46	15,4	51,1	0,5
4,6	43,09	6,1	24,7	5,4	1,4	4,4	0,6	4,2	0,8	2,3	0,4	2,2	0,3	2,18	13,8	42,9	0,6
4,7	54,48	7,1	28,1	6,1	1,4	5,8	0,7	4,3	0,9	2,3	0,3	2,2	0,3	2,44	15,6	45,7	0,7
4,8	57,58	7,5	28,4	6,4	1,5	5,3	0,7	3,9	0,9	2,7	0,4	2,3	0,4	2,56	15,3	36,7	0,9
4,9	45,99	5,6	22,6	5,1	1,5	4,2	0,6	3,8	0,8	2,1	0,3	2	0,3	1,68	12,9	36	0,5
4,1	67,51	9,6	37,2	6,6	1,7	6,8	1,1	5,4	1,2	2,8	0,4	2,5	0,4	1,23	19,6	55,4	0,6
5,1	60,63	8,1	29,4	6,2	1,5	5,1	0,7	4,5	0,9	2,3	0,4	2,4	0,4	1,53	13,1	57,5	0,5
5,2	50,04	6	24,8	4,8	1,3	5	0,7	4,3	0,8	2,3	0,3	2,1	0,4	1,39	10,5	50,5	0,5
5,3	56,57	6,6	27,7	5,9	1,8	5,9	0,8	4,8	1	2,5	0,3	2,3	0,3	1,95	12,7	55,4	0,5
5,4	68,89	8,2	33,5	6,5	1,7	6,3	0,8	4,5	0,9	2,4	0,4	2,3	0,4	2	15	40,7	0,5
5,5	51,99	6,2	24,4	4,7	1,5	4,6	0,6	4,2	0,7	2,1	0,3	2	0,2	1,74	9,9	51,5	0,6
5,6	59,02	7,1	30,7	6,6	1,6	5,5	0,8	4,2	0,9	2,4	0,3	2,2	0,4	2,18	13,2	49,5	0,5
5,7	58,62	7,4	28,6	6,2	1,7	5	0,8	4,6	0,9	2,7	0,3	2,3	0,3	2,63	13,6	44,2	0,5
5,8	55,72	6,7	29,1	6,2	1,8	5,7	0,7	4,8	1	2,4	0,4	2,3	0,4	2,68	14,1	39,9	0,9
5,9	60,09	7	27,4	5,5	1,4	5,4	0,8	4,1	0,9	2,5	0,3	2,5	0,3	2,49	10,9	34	0,9
5,1	69,34	8,1	34	6,7	1,7	6	0,9	5,4	1,1	3	0,4	2,8	0,5	2,78	12,4	27,2	0,9

Muestra	Nb	Cs	Ga	In	Re	Se	Te	Tl
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
1,1	9,45	2,2	16,94	0,08	<0,002	0,6	<0,05	0,32
1,2	7,61	1,7	19,53	0,08	0,004	1,2	0,19	0,28
1,3	9,65	2	16,25	0,08	0,002	0,4	0,18	0,34
1,5	10,45	2	16,67	0,08	<0,002	0,7	0,06	0,28
1,6	10,52	1,7	14,65	0,08	0,003	<0,3	0,08	0,26
2,1	7,48	1,9	17,43	0,08	<0,002	0,5	0,12	0,34
2,2	9,48	1,7	16	0,05	0,004	0,8	0,14	0,25
2,3	10,77	1,8	17,8	0,08	0,002	0,7	0,08	0,26
2,4	9,83	1,6	18,27	0,08	0,002	<0,3	0,15	0,23
2,5	9,07	2,9	18,97	0,07	<0,002	0,5	0,1	0,34
2,6	9,83	2,3	15,97	0,07	0,002	0,9	0,07	0,3
2,7	14,05	1,9	19,13	0,11	<0,002	0,4	<0,05	0,19
2,8	9,03	1,8	15,97	0,04	<0,002	0,4	<0,05	0,23
3,1	7,43	1,7	16,23	0,06	0,002	0,8	0,25	0,27
3,2	9,45	1,9	17,54	0,06	0,003	0,6	0,21	0,32
3,3	8,22	2,2	16,87	0,05	<0,002	0,8	0,07	0,26
3,4	7,51	2	16,52	0,05	<0,002	0,4	0,18	0,3
3,5	8,41	2,3	15,73	0,06	0,003	0,4	<0,05	0,27
3,6	7,61	2,3	16,42	0,08	<0,002	0,4	0,06	0,23
3,7	11,79	2,4	16,37	0,07	0,003	0,5	0,09	0,27
3,8	14,87	2	19,99	0,11	<0,002	0,8	<0,05	0,2
3,9	12,28	2	17,14	0,08	<0,002	<0,3	<0,05	0,25
3,1	10,05	1,8	18,77	0,07	<0,002	0,3	0,08	0,29
4,1	7,61	1,9	16,36	0,07	<0,002	0,7	0,06	0,29
4,2	6,45	2	15,54	0,06	<0,002	0,6	0,12	0,25
4,3	6,6	2	16,34	0,07	0,003	0,8	0,09	0,21
4,4	8,31	2,4	16,85	0,05	<0,002	0,6	0,12	0,27
4,5	8,1	2,1	15,93	0,05	<0,002	0,4	0,07	0,28
4,6	9,33	1,9	14,86	0,06	0,004	0,7	0,08	0,24
4,7	10,32	2,1	17,6	0,06	<0,002	0,8	<0,05	0,26
4,8	13,92	2,1	18,62	0,11	<0,002	0,6	<0,05	0,23
4,9	8,34	1,7	16,14	0,07	<0,002	0,5	0,15	0,23
4,1	11,29	2,4	23,4	0,12	<0,002	<0,3	<0,05	0,5
5,1	7,27	2,1	18,85	0,09	<0,002	0,6	0,05	0,41
5,2	7,03	1,9	15,78	0,09	<0,002	<0,3	0,16	0,3
5,3	7,29	2,1	15,84	0,05	<0,002	<0,3	0,08	0,31
5,4	8,52	2,1	17,37	0,05	<0,002	<0,3	0,06	0,32
5,5	9,87	1,5	14,57	0,08	<0,002	<0,3	0,07	0,26
5,6	8,18	1,7	16,48	0,06	<0,002	<0,3	0,19	0,32
5,7	8,85	2,2	18,36	0,05	<0,002	0,4	<0,05	0,26
5,8	13,2	2,2	18,78	0,09	<0,002	0,4	<0,05	0,22
5,9	13,84	2,1	20,66	0,15	0,003	0,3	<0,05	0,2
5,1	13,76	1,9	20,2	0,11	0,005	0,5	0,06	0,2

## C Concentración corteza continental (Taylor & McLennan, 2009)

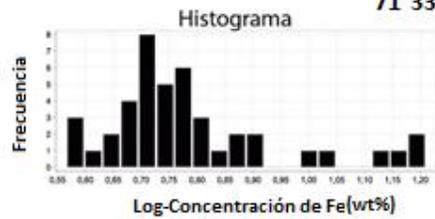
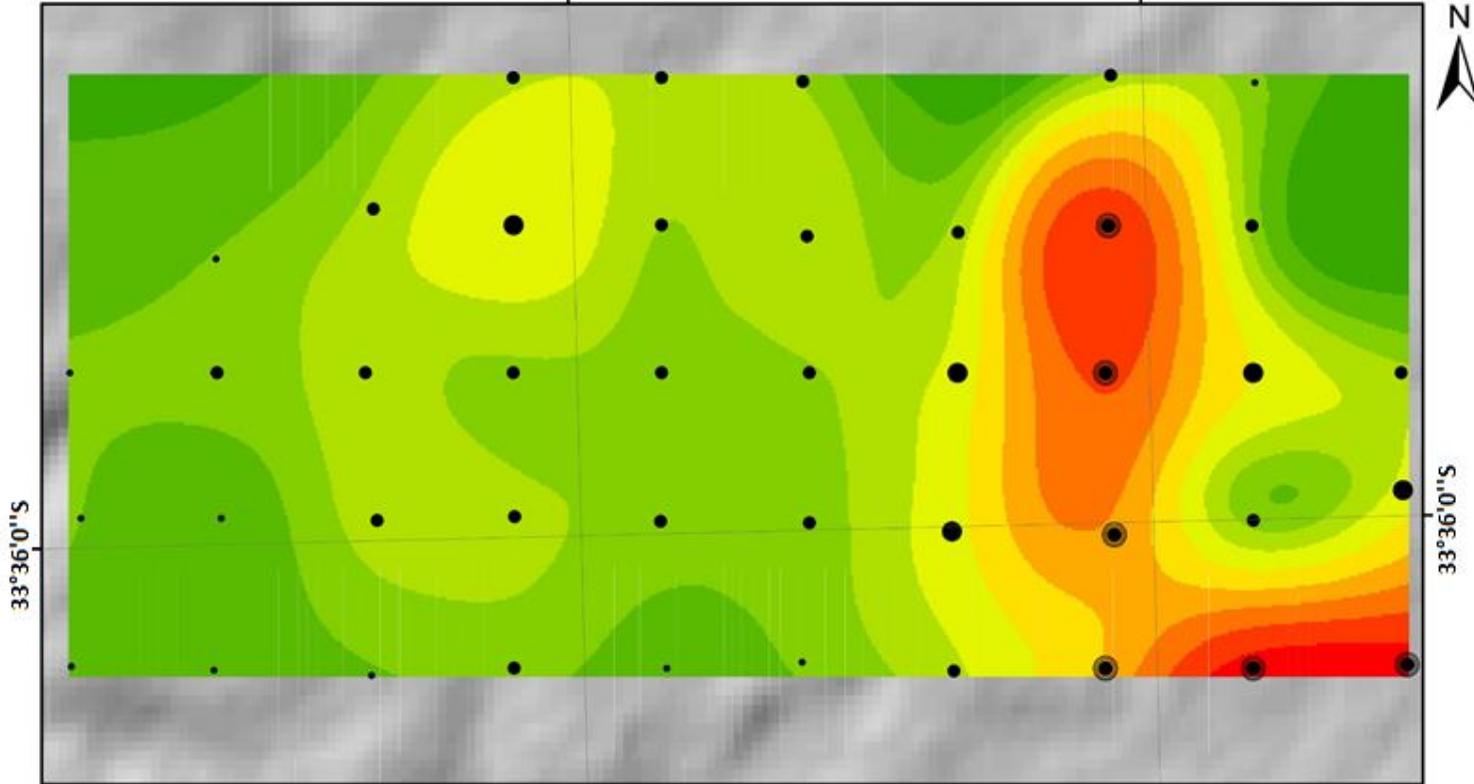
Elemento	Concentración	Unidad
Fe	3,5	wt%
Ca	3	wt%
P	700	ppm
Mg	1,33	wt%
Ti	0,41	wt%
Al	8,04	wt%
Na	2,89	wt%
K	2,8	wt%
Mn	600	ppm
Mo	1,5	ppm
Cu	25	ppm
Pb	17	ppm
Zn	71	ppm
Ag	50	ppb
Ni	44	ppm
Co	17	ppm
As	1,5	ppm
U	2,8	ppm
Th	10,7	ppm
Sr	350	ppm
Sb	0,2	ppm
Bi	127	ppb
V	107	ppm
La	30	ppm
Cr	83	ppm
Ba	550	ppm
W	2	ppm
Zr	190	ppm
Sn	5,5	ppm
Sc	13,6	ppm
Y	22	ppm
Ce	64	ppm
Pr	7,1	ppm
Nd	26	ppm
Sm	4,5	ppm
Eu	0,88	ppm

Gd	3,8	ppm
Tb	0,64	ppm
Dy	3,5	ppm
Ho	0,8	ppm
Er	2,3	ppm
Tm	0,33	ppm
Yb	2,2	ppm
Hf	5,8	ppm
Li	20	ppm
Rb	112	ppm
Ta	1	ppm
Nb	12	ppm
Cs	4,6	ppm
Ga	17	ppm
In	50	ppb
Tl	750	ppb

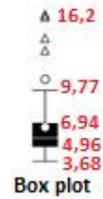
## **D Mapas de distribución**

**Geoquímica de suelos**  
**Concentración de Hierro (wt%)**  
 71°33'0"W

71°32'30"W

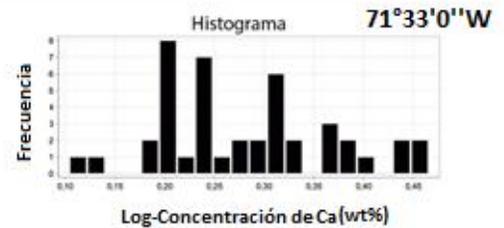
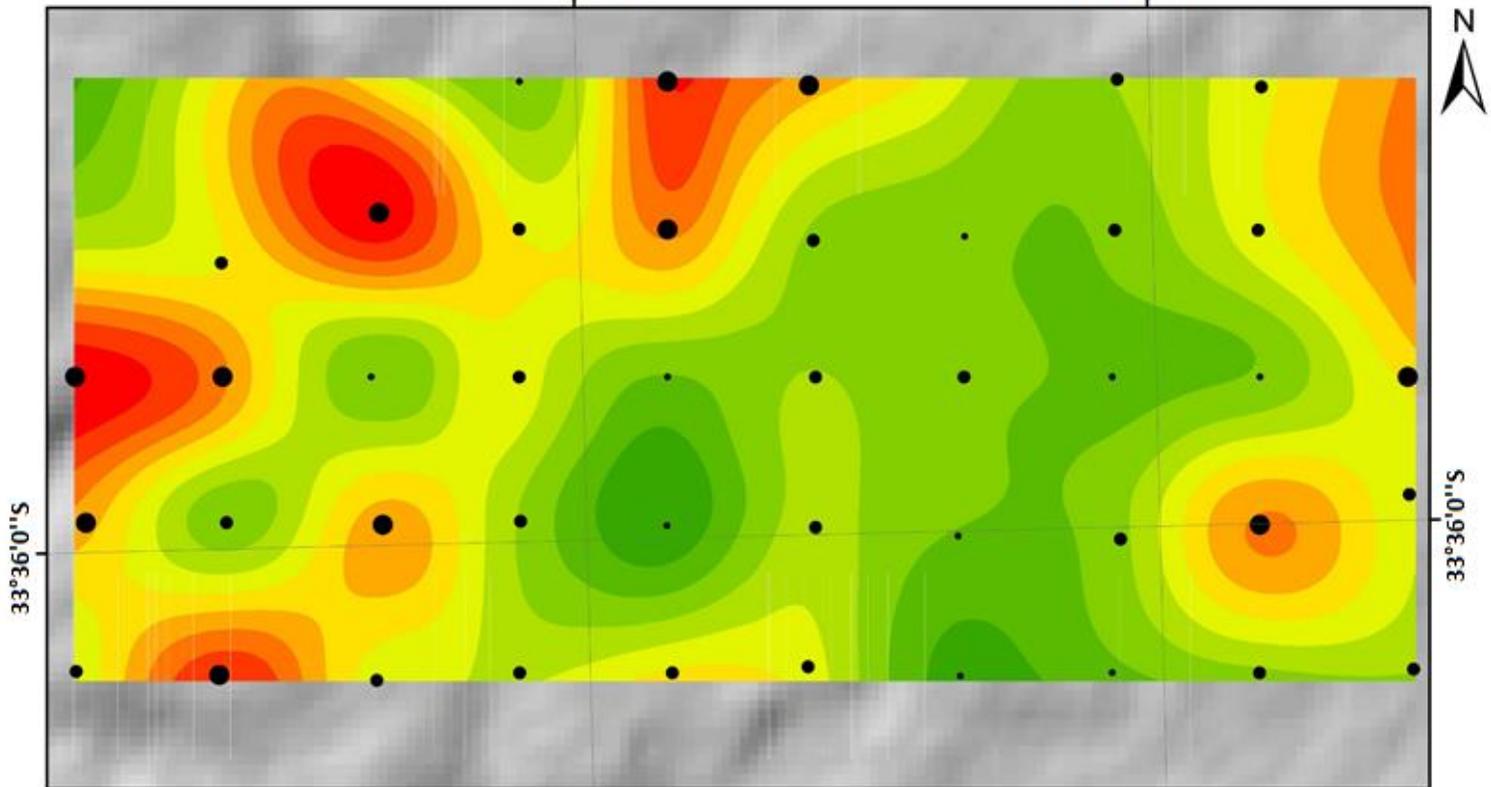


- 9,77-16,2
- 6,94-9,77
- 4,96-6,94
- 3,68-4,96

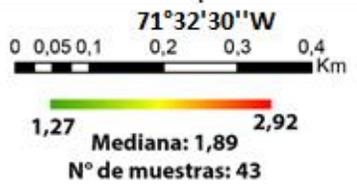
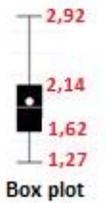


Geoquímica de suelos  
Concentración de Calcio (wt%)  
71°33'0"W

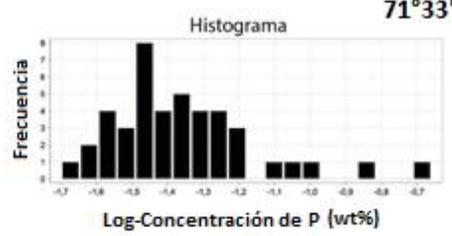
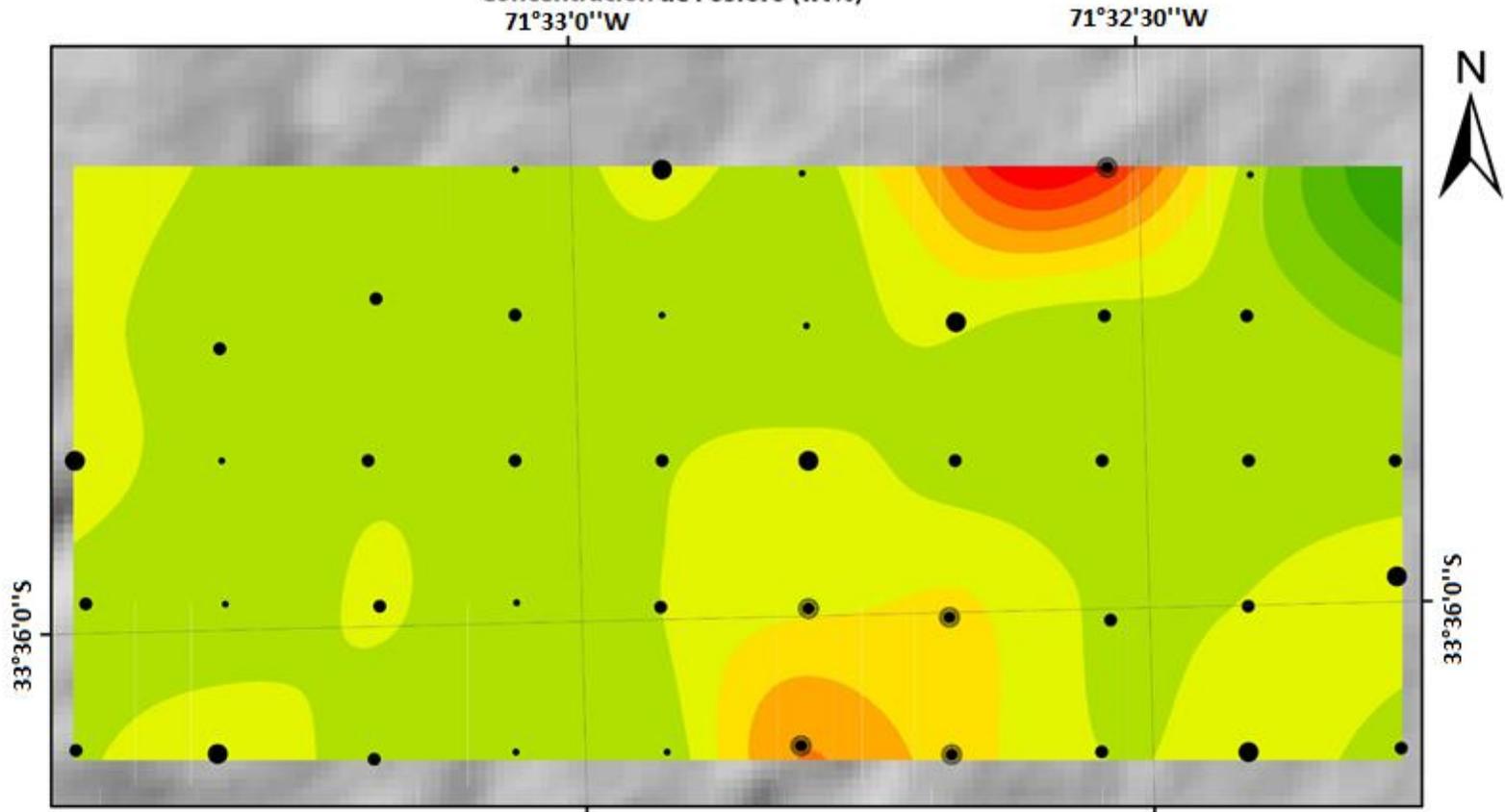
71°32'30"W



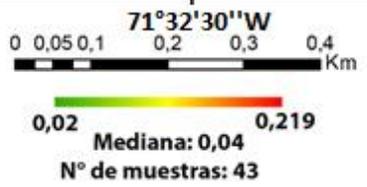
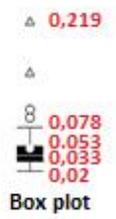
- 2,14-2,92
- 1,62-2,14
- 1,27-1,62



Geoquímica de suelos  
Concentración de Fósforo (wt%)

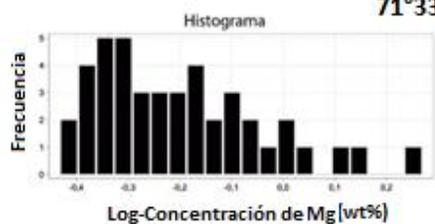
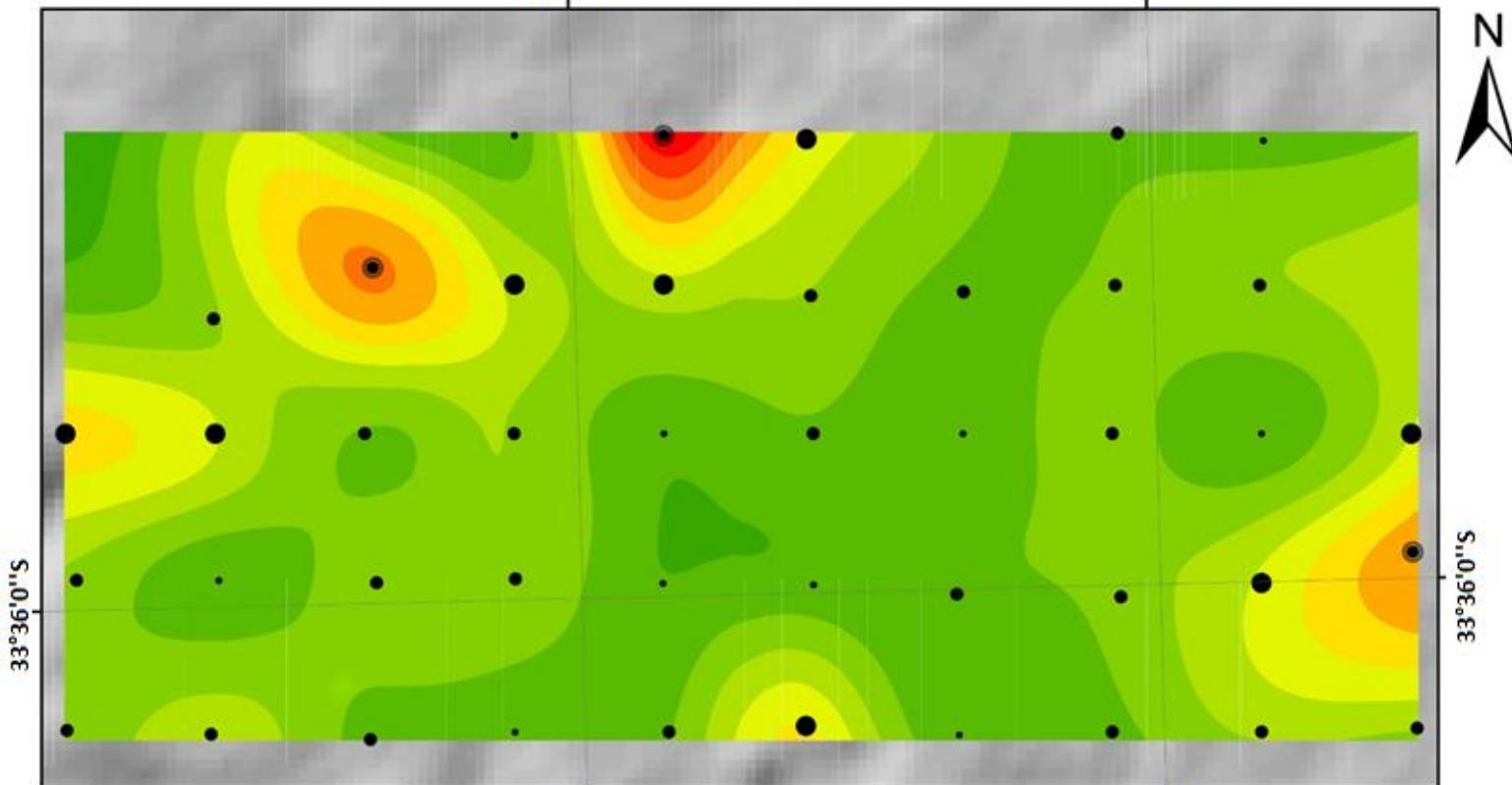


- 0,078-0,219
- 0,053-0,078
- 0,033-0,053
- 0,02-0,033

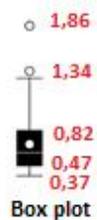


**Geoquímica de suelos**  
**Concentración de Magnesio (wt%)**  
 71°33'0"W

71°32'30"W

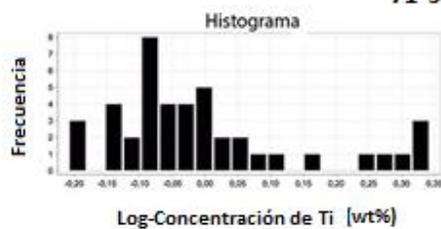
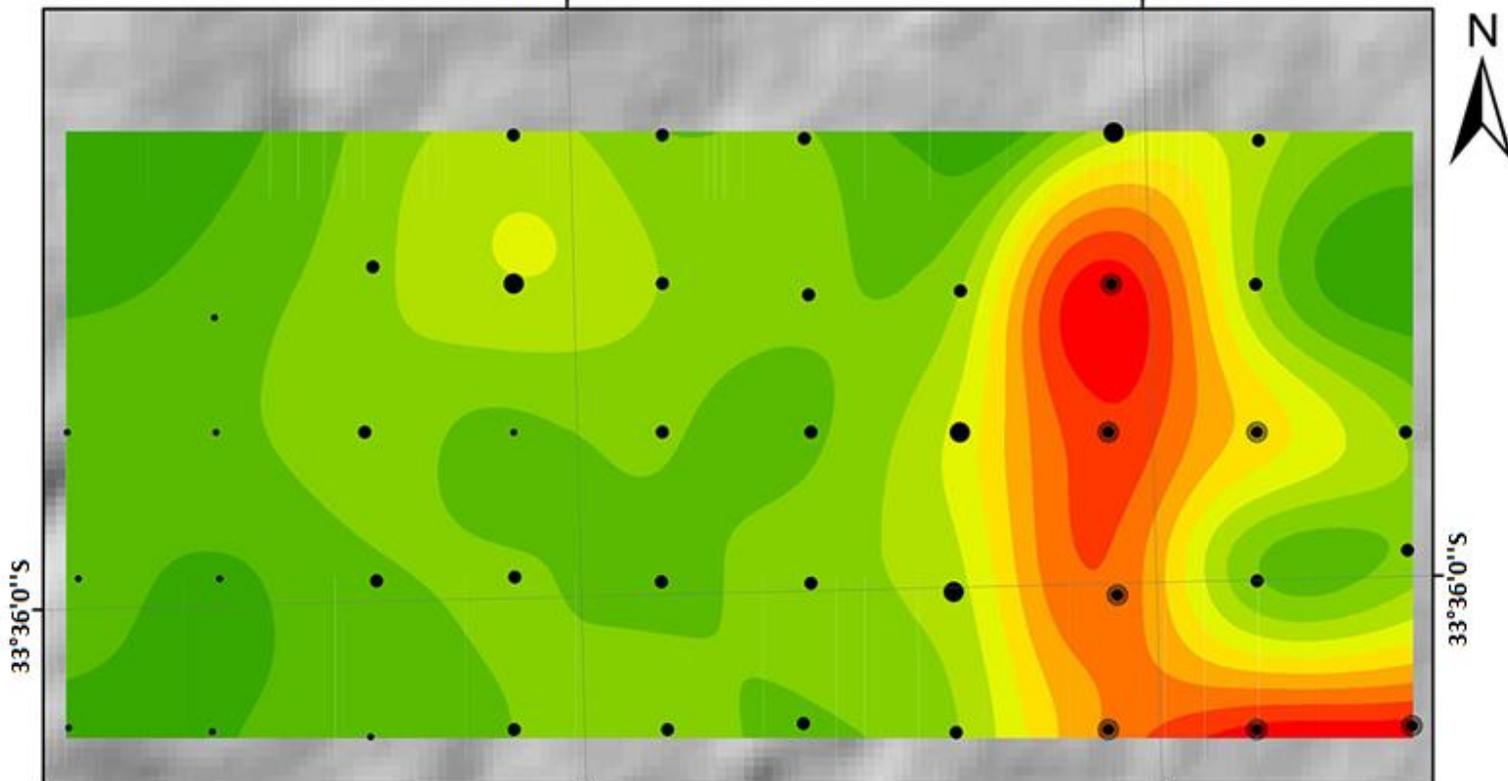


- 1,34-1,86
- 0,82-1,34
- 0,47-0,82
- 0,37-0,47

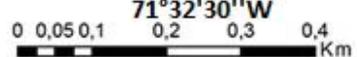
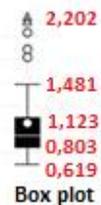


**Geoquímica de suelos**  
**Concentración de Titanio (wt%)**  
 71°33'0"W

71°32'30"W

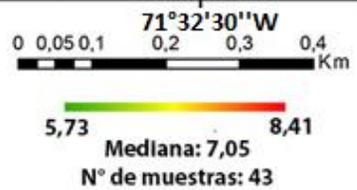
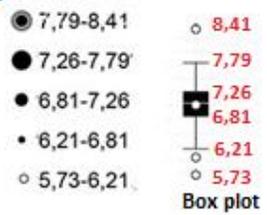
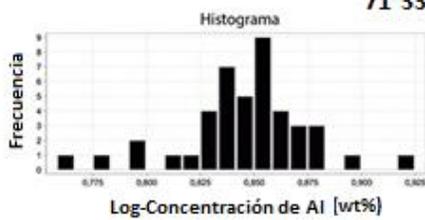
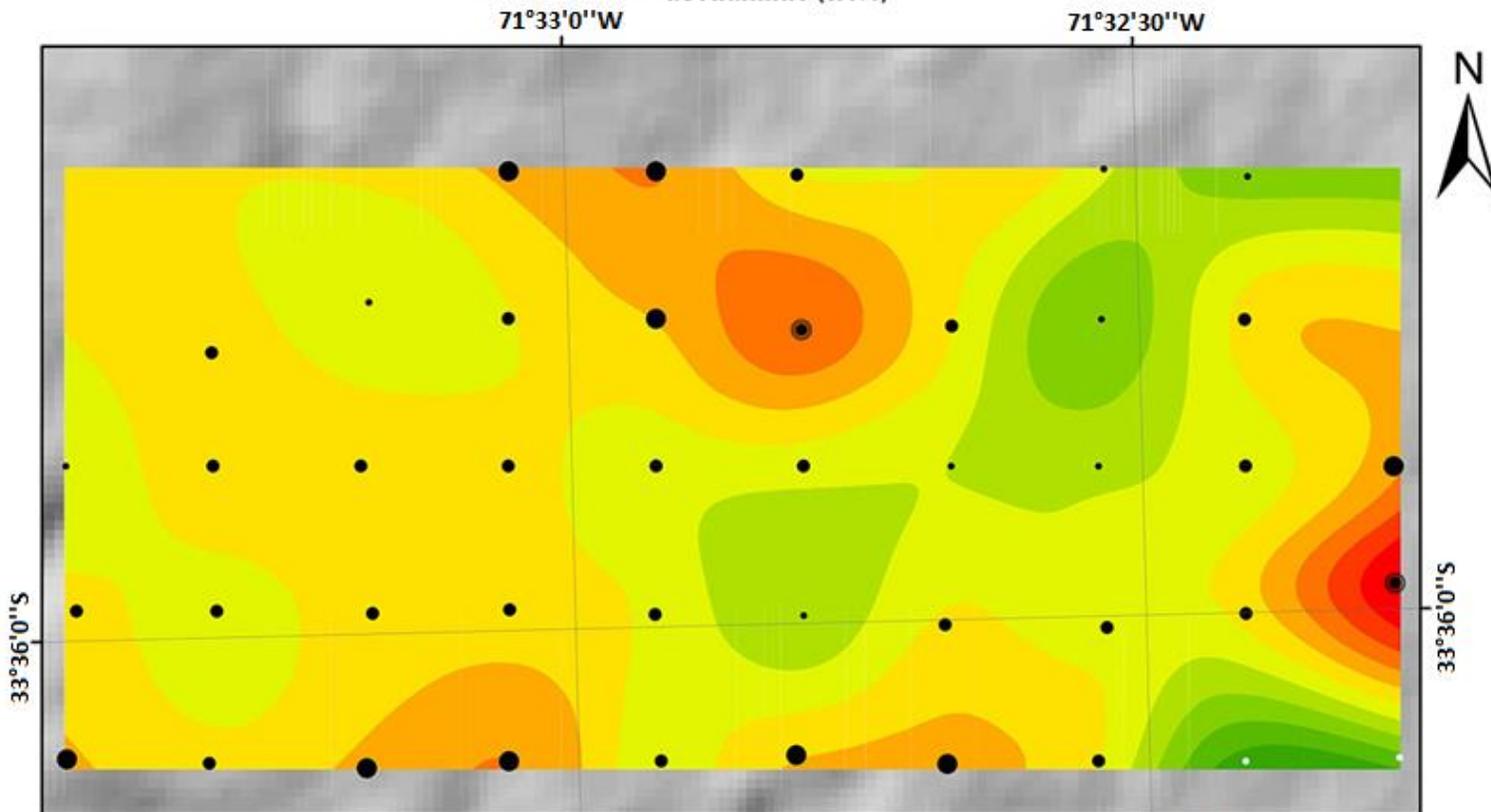


- 1,481-2,202
- 1,123-1,481
- 0,803-1,123
- 0,619-0,803



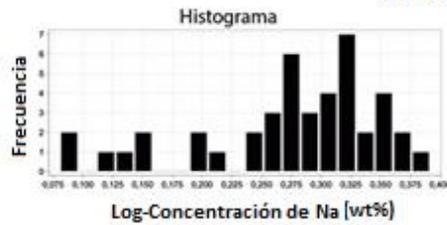
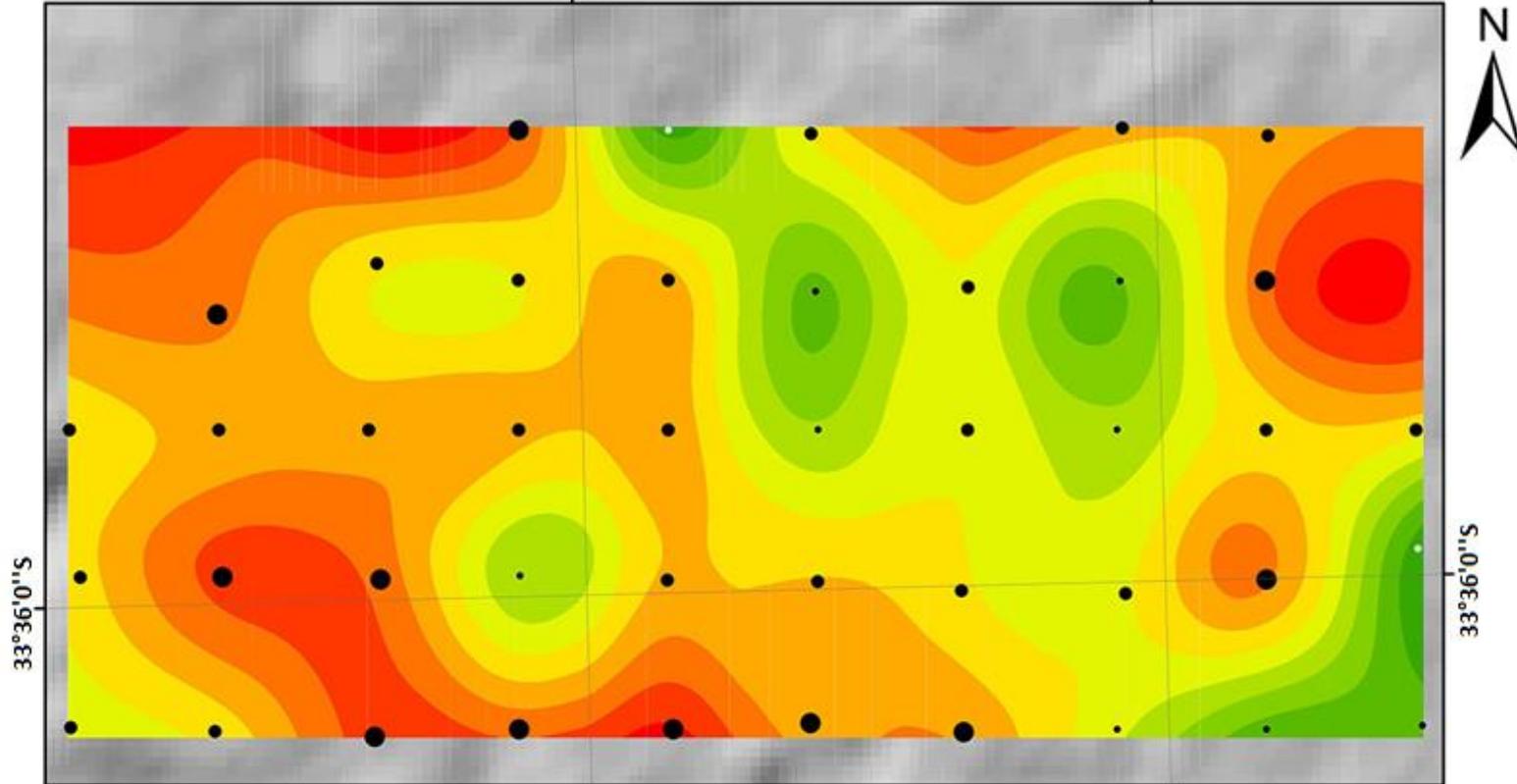
0,62 Mediana: 0,93 2,20  
 N° de muestras: 43

**Geoquímica de suelos**  
**Concentración de Aluminio (wt%)**

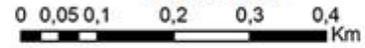
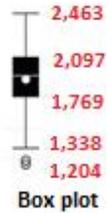


**Geoquímica de suelos**  
**Concentración de Sodio (wt%)**  
 71°33'0"W

71°32'30"W

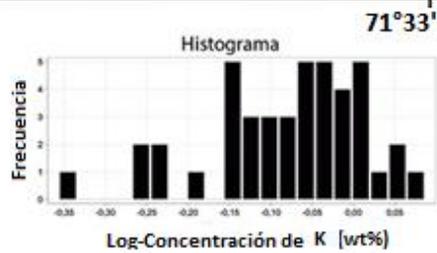
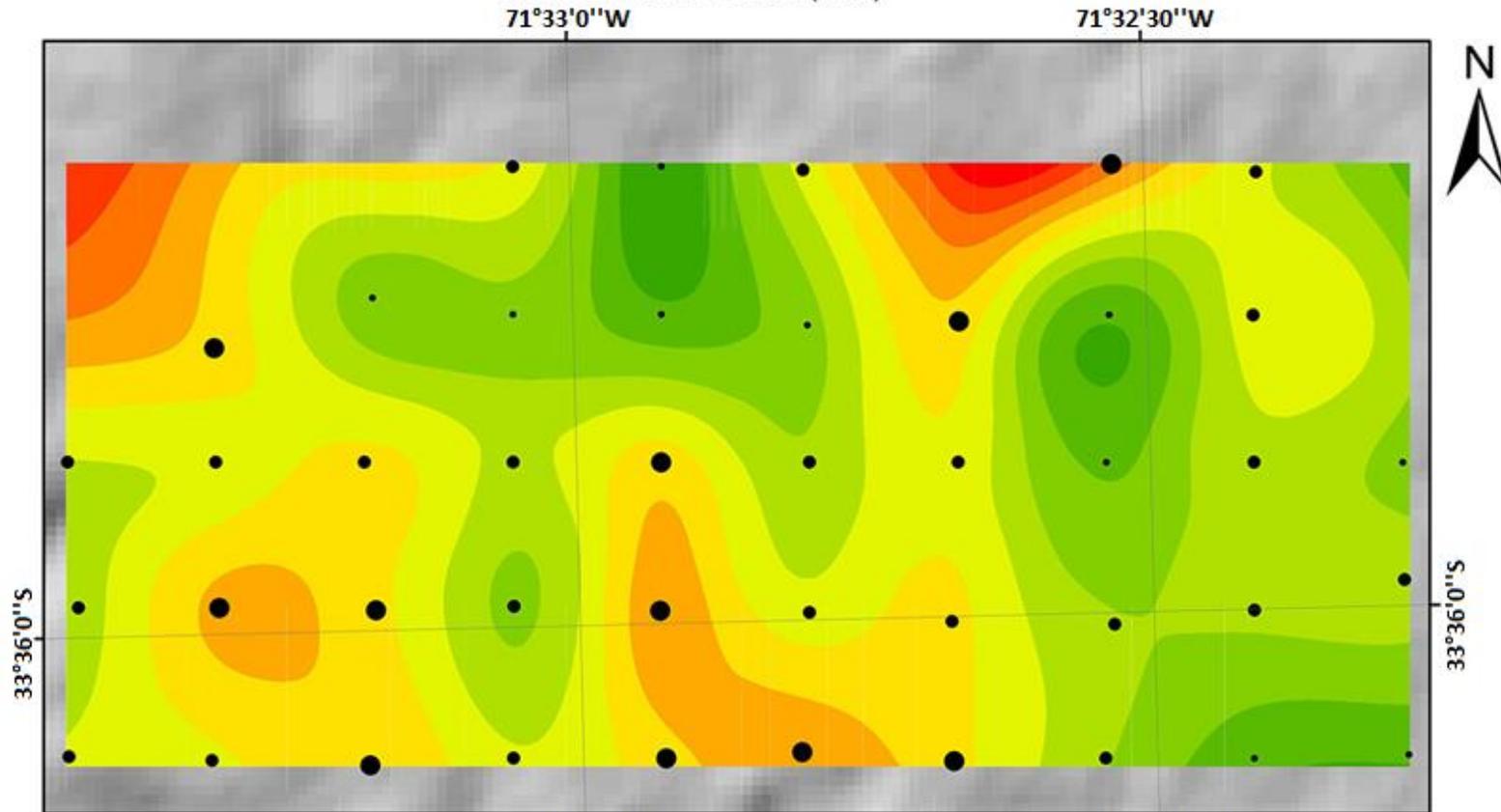


- 2,097-2,463
- 1,769-2,097
- 1,338-1,769
- 1,204-1,338

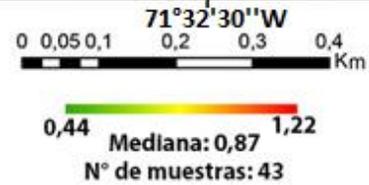
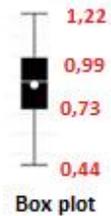


1,20 Mediana: 1,94 2,46  
 N° de muestras: 43

Geoquímica de suelos  
Concentración de Potasio (wt%)

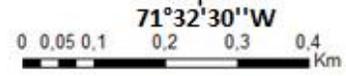
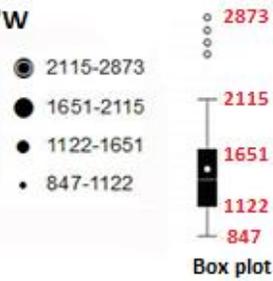
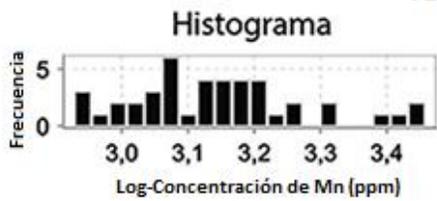
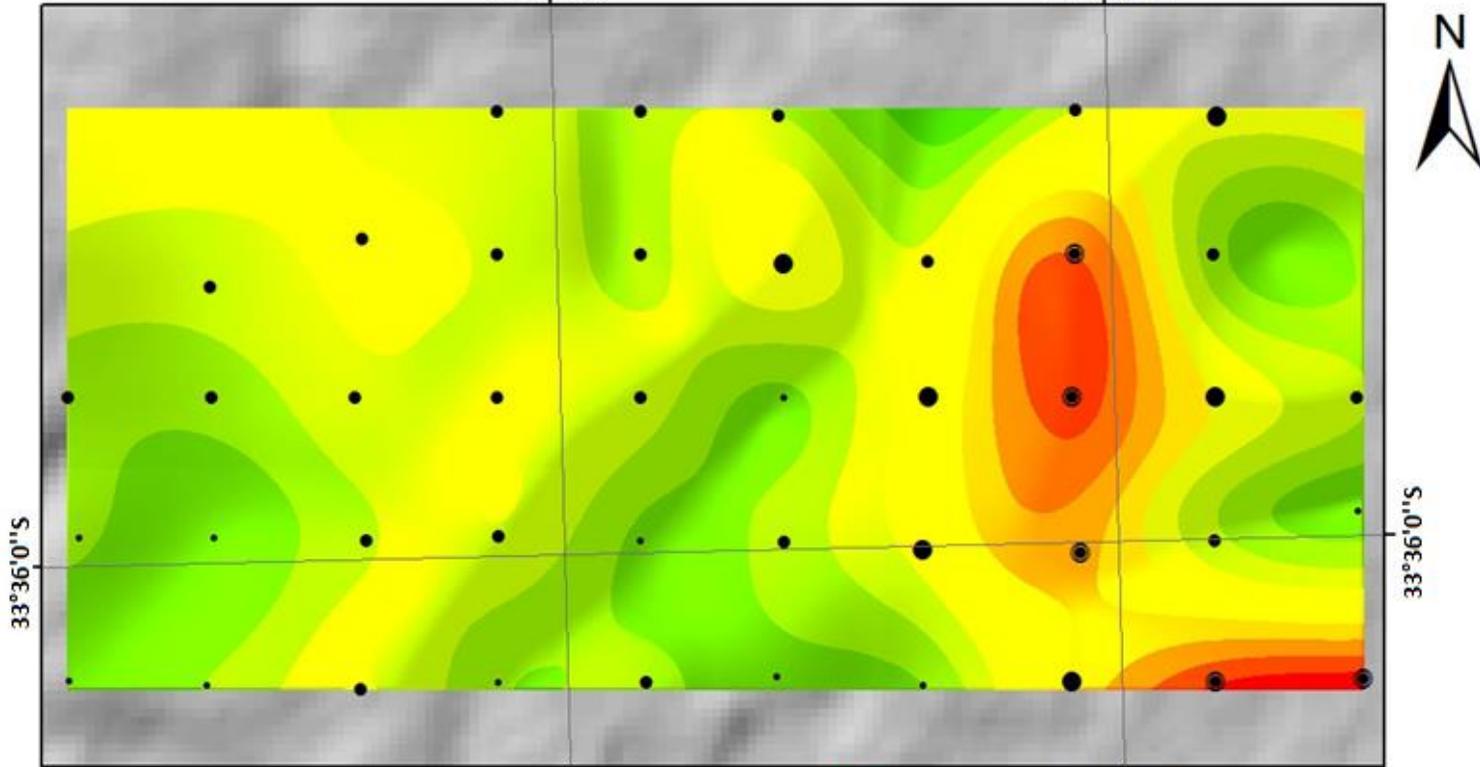


- 0,99-1,22
- 0,73-0,99
- 0,44-0,73

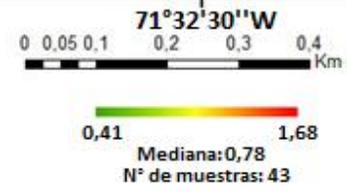
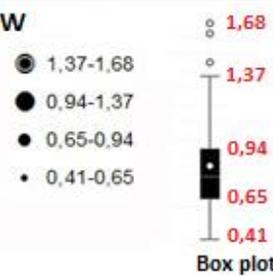
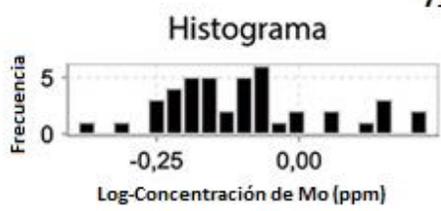
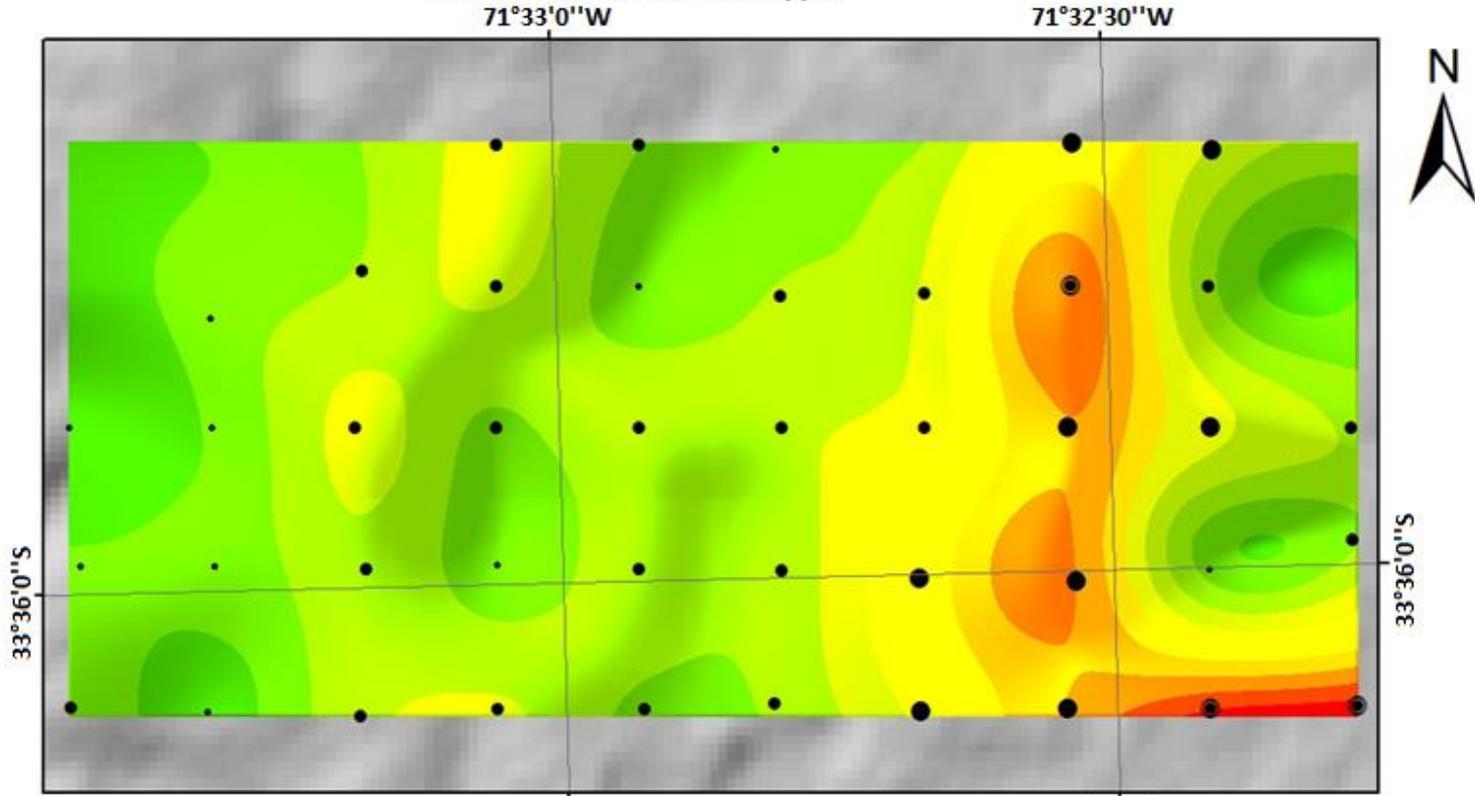


Geoquímica de suelos  
 Concentración de Manganeso (ppm)  
 71°33'0"W

71°32'30"W

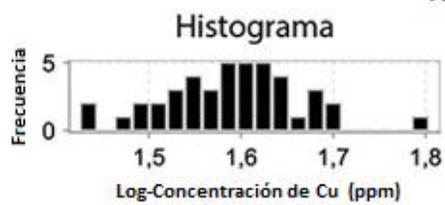
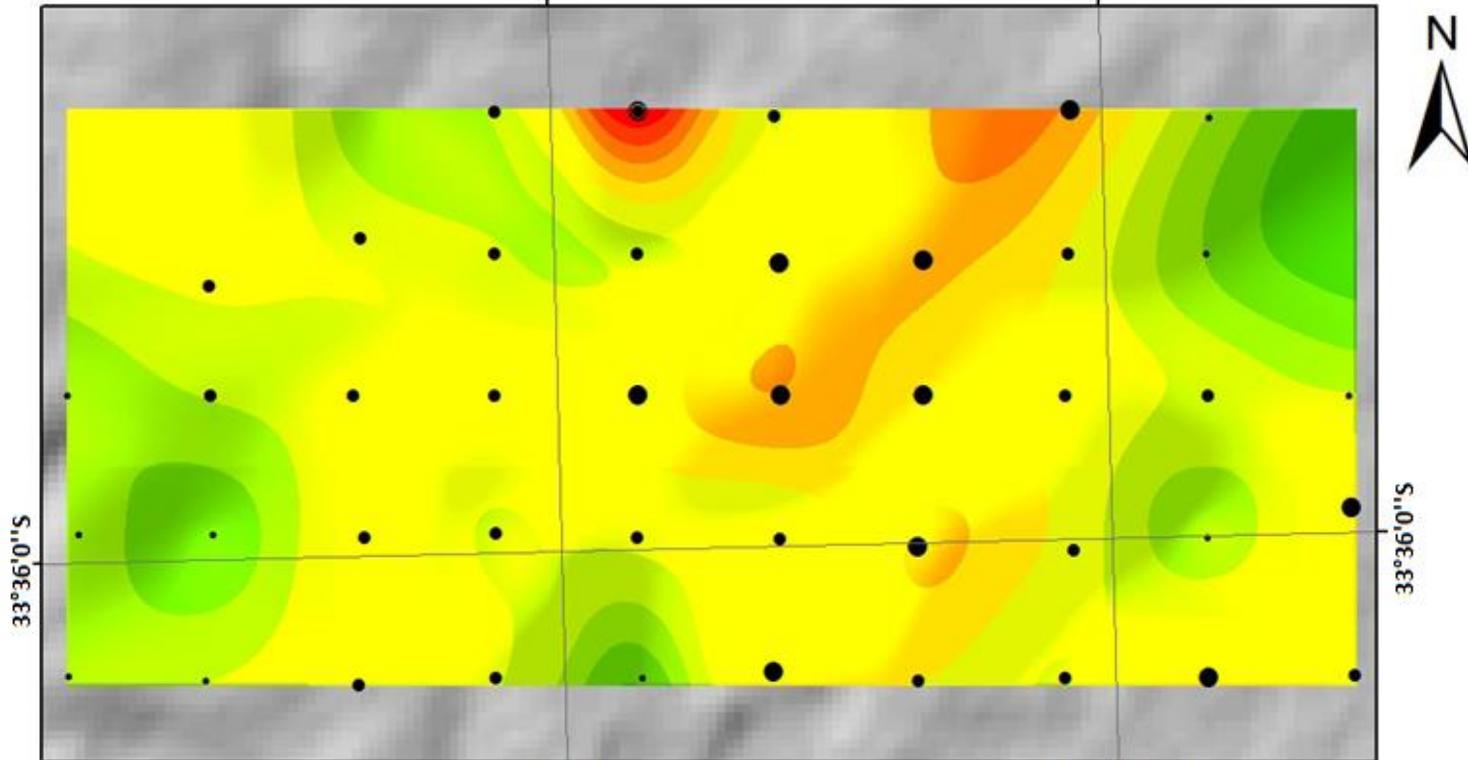


Geoquímica de suelos  
Concentración de Molibdeno (ppm)

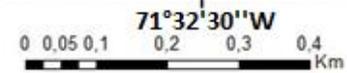


Geoquímica de suelos  
Concentración de Cobre (ppm)  
71°33'0"W

71°32'30"W



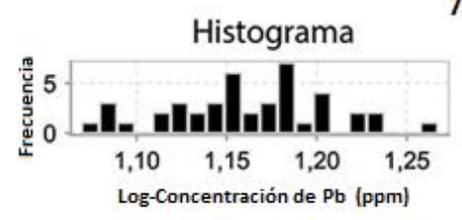
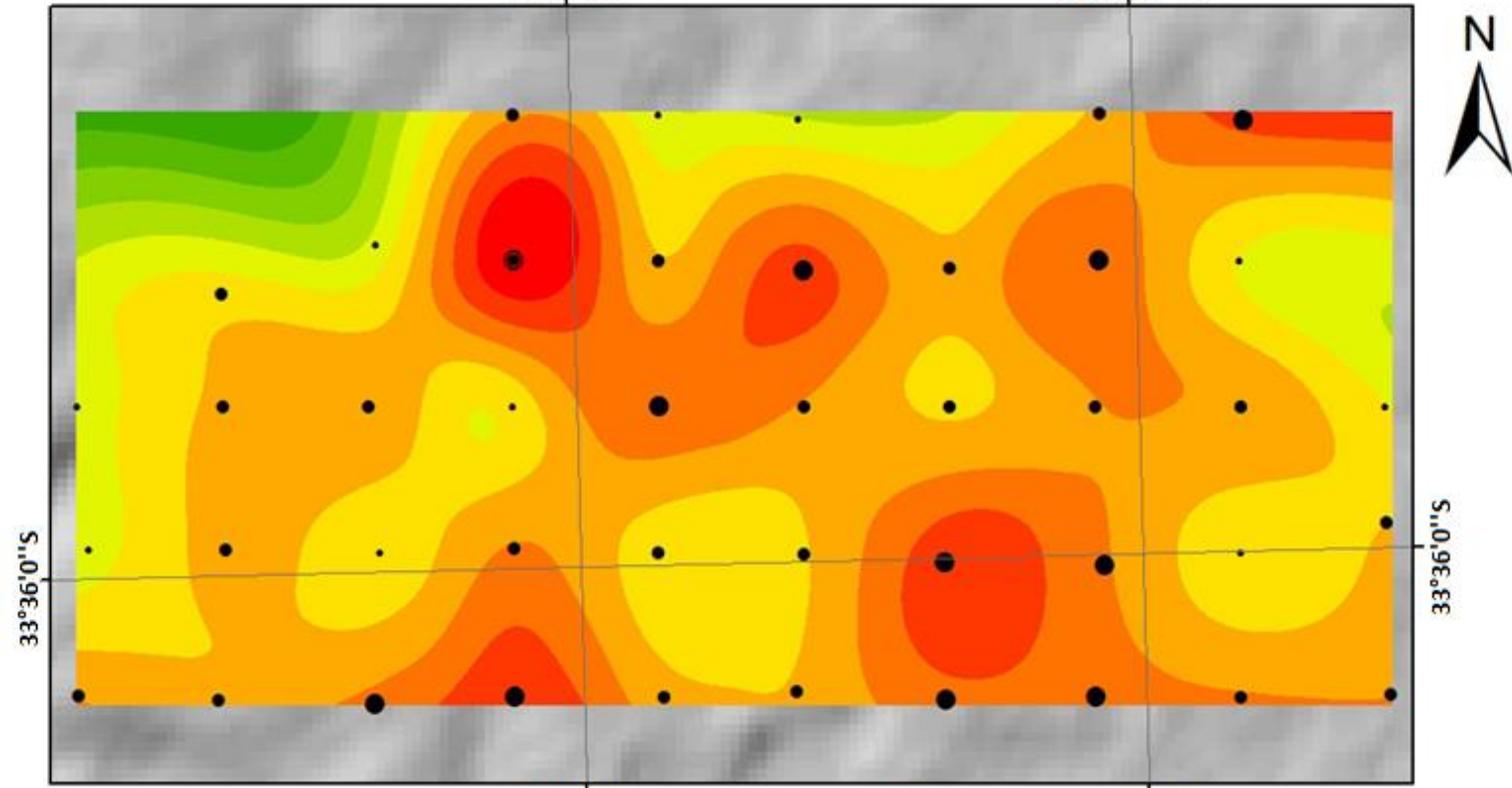
- 51,2-63,2
- 43,3-51,2
- 34,6-43,3
- 26,6-34,6



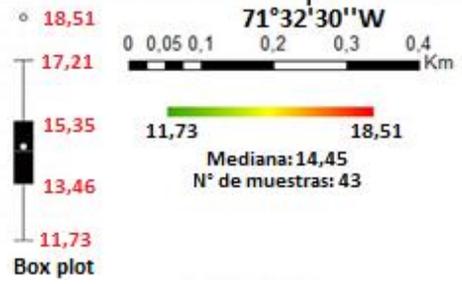
26,6 63,2  
Mediana: 39,1  
N° de muestras: 43

Geoquímica de suelos  
 Concentración de Plomo (ppm)  
 71°33'0"W

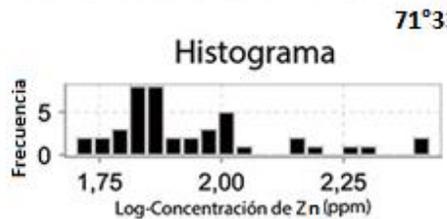
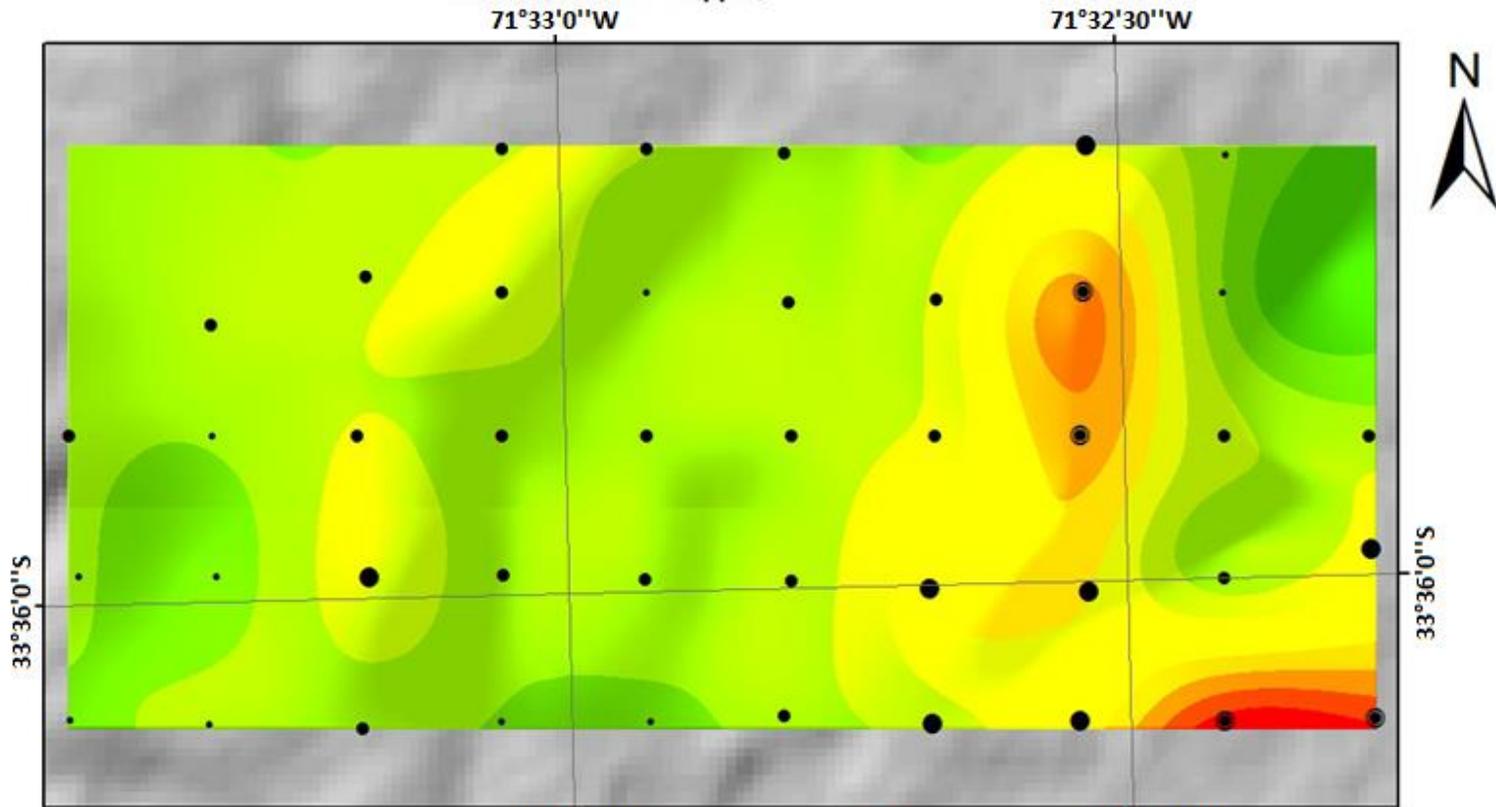
71°32'30"W



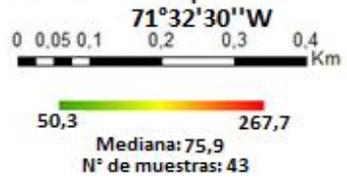
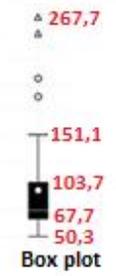
- 17,21-18,51
- 15,35-17,21
- 13,46-15,35
- 11,73-13,46



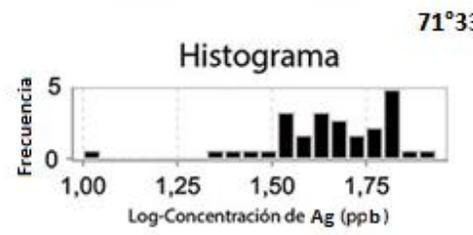
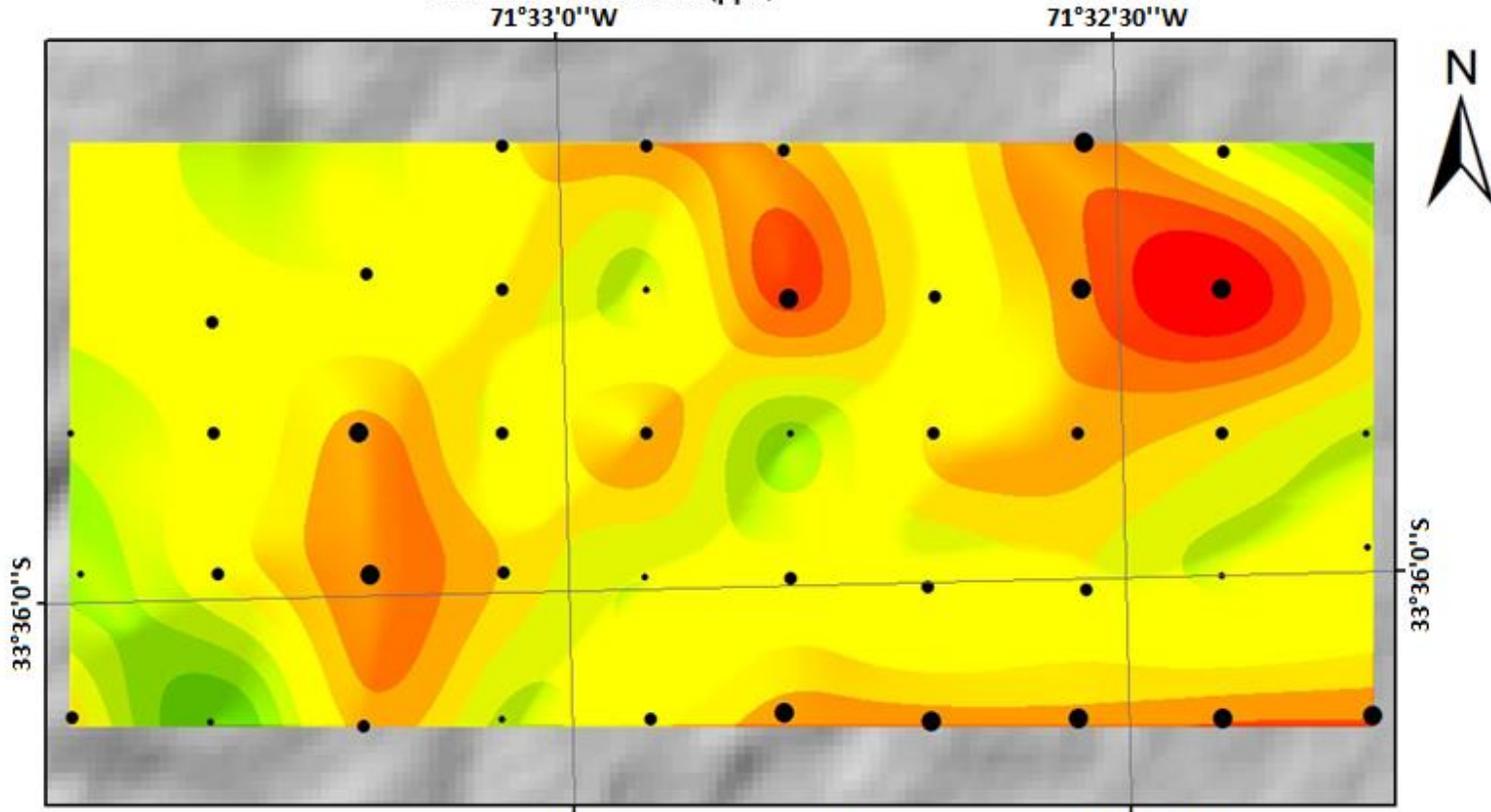
Geoquímica de suelos  
Concentración de Zinc (ppm)



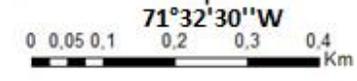
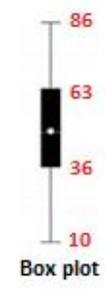
- 151,1-267,7
- 103,7-151,1
- 67,7-103,7
- 50,3-67,7



Geoquímica de suelos  
Concentración de Plata (ppb)



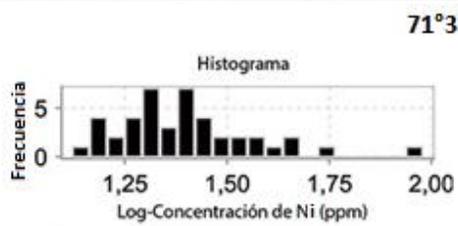
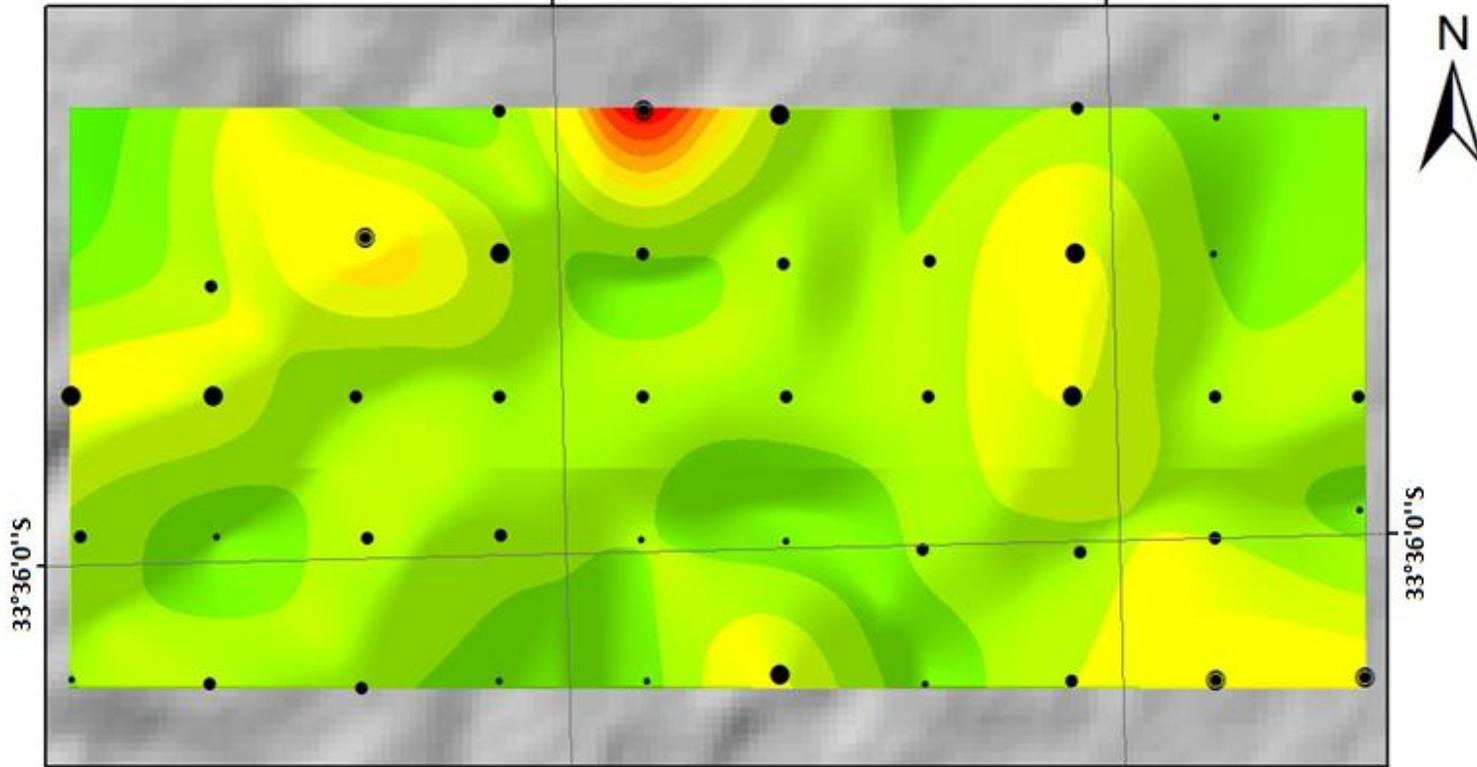
- 63-86
- 36-63
- 10-36



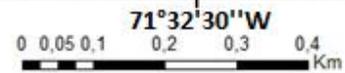
10 86  
Mediana: 48  
N° de muestras: 43

Geoquímica de suelos  
 Concentración de Níquel (ppm)  
 71°33'0"W

71°32'30"W



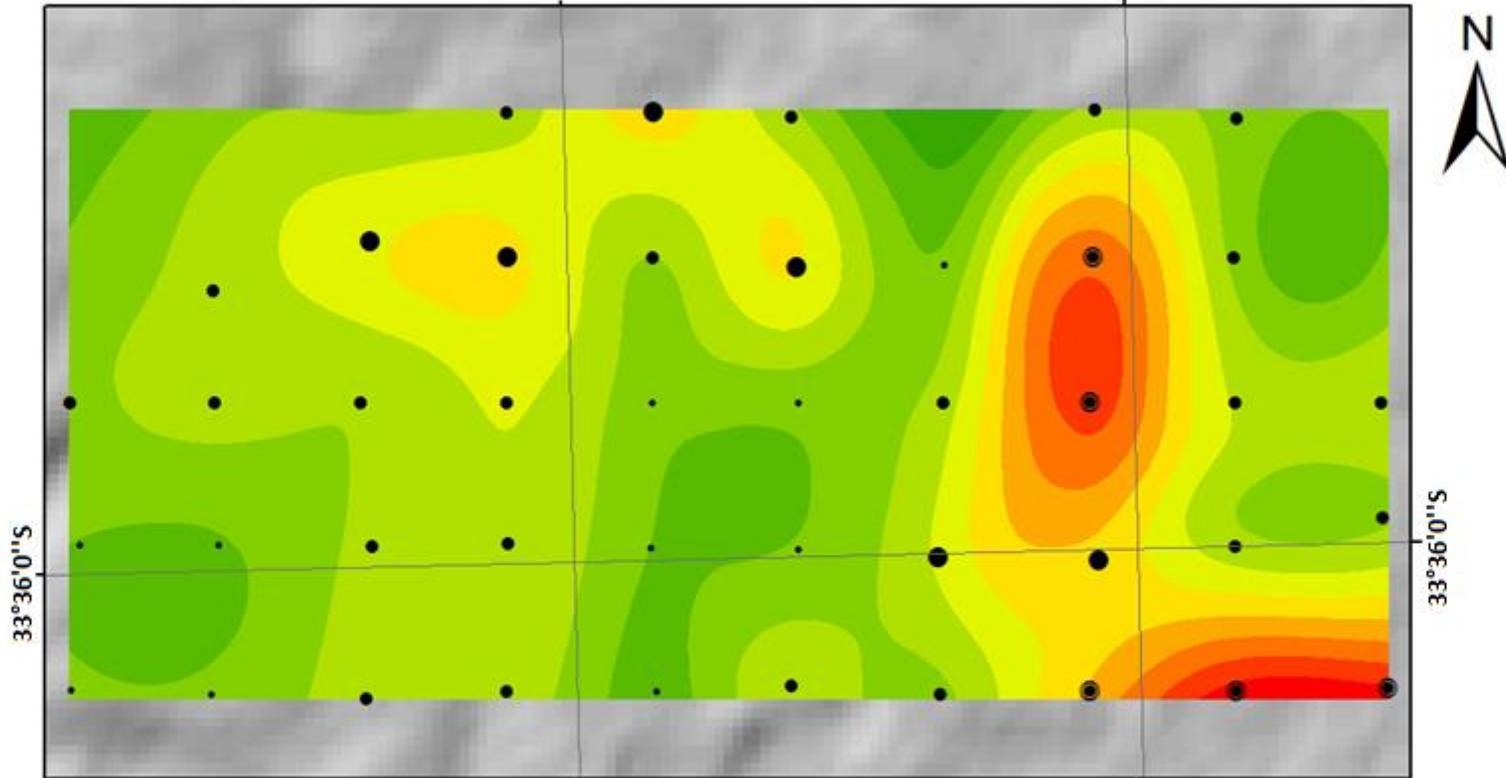
- 39,7-95,4
- 30,2-39,7
- 19,3-30,2
- 13,2-19,3



13,2 95,4  
 Mediana: 24,2  
 N° de muestras: 43

Geoquímica de suelos  
Concentración de Cobalto (ppm)  
71°33'0"W

71°32'30"W



33°36'0"S

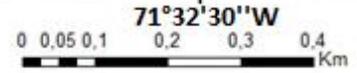
33°36'10"S

71°33'0"W

71°32'30"W



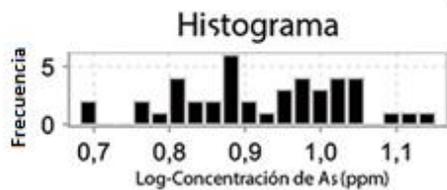
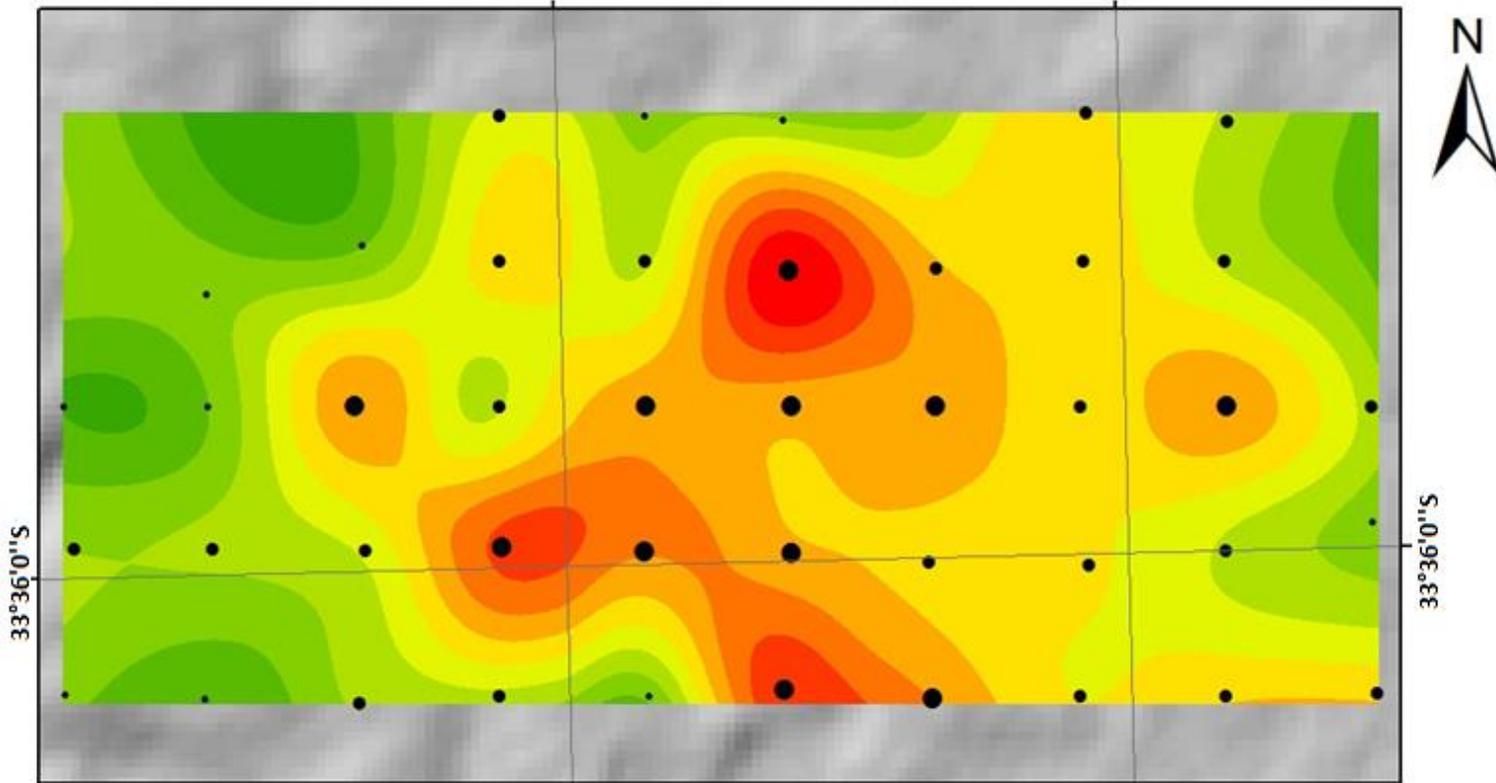
- 31,7-44,8
- 23,5-31,7
- 16,9-23,5
- 12,7-16,9



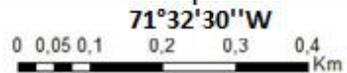
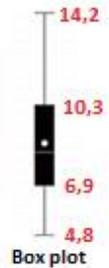
12,7 44,8  
Mediana: 20,5  
N° de muestras: 43

Geoquímica de suelos  
Concentración de Arsénico (ppm)  
71°33'0"W

71°32'30"W



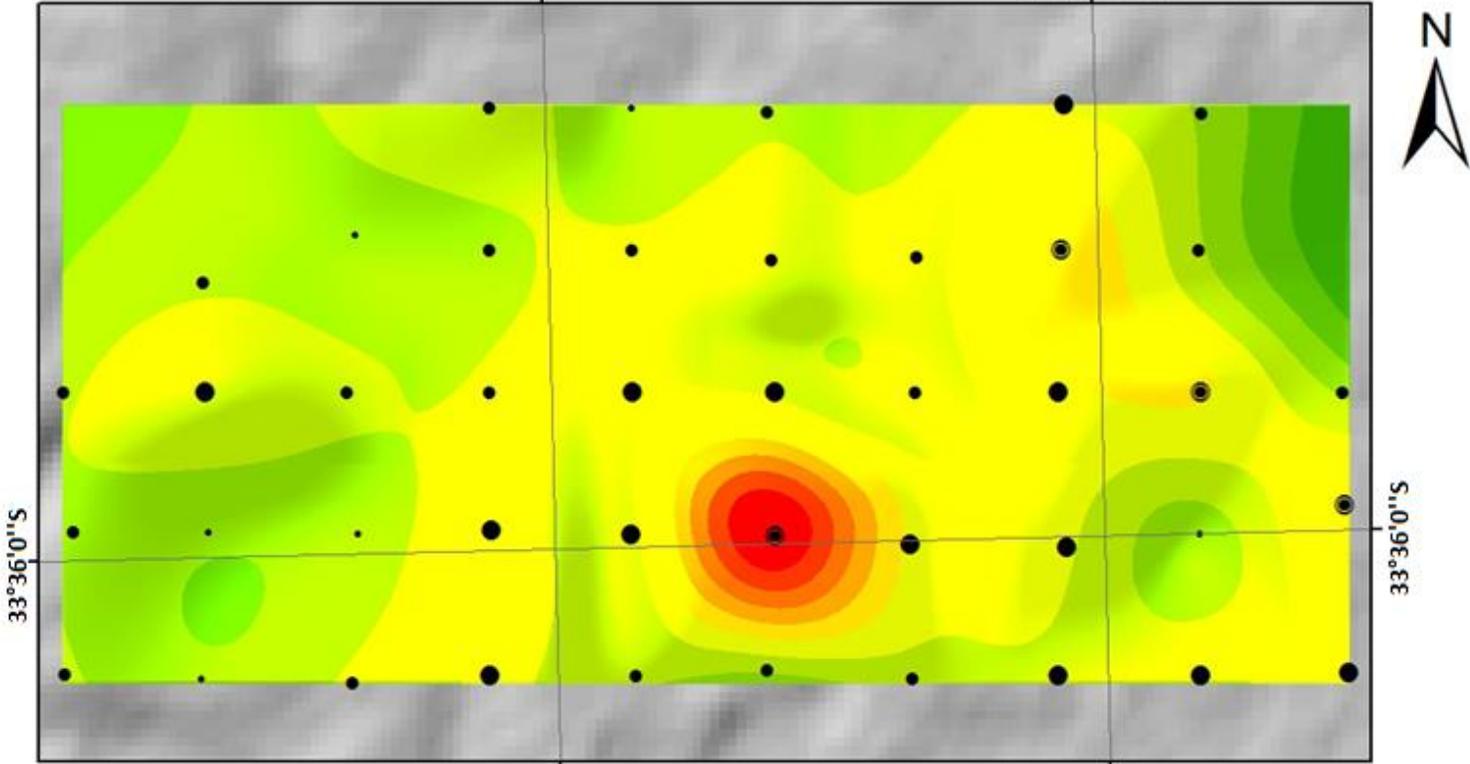
- 10,3-14,2
- 6,9-10,3
- 4,8-6,9



4,8 14,2  
Mediana: 8,3  
N° de muestras: 43

Geoquímica de suelos  
 Concentración de Uranio (ppm)  
 71°33'0"W

71°32'30"W

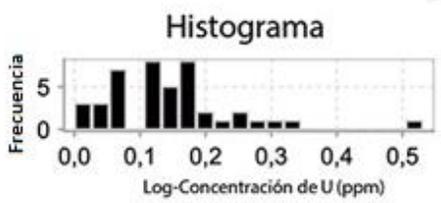


33°36'0\"/>

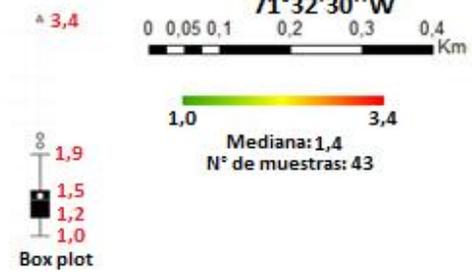
33°36'0\"/>

71°33'0\"/>

71°32'30\"/>

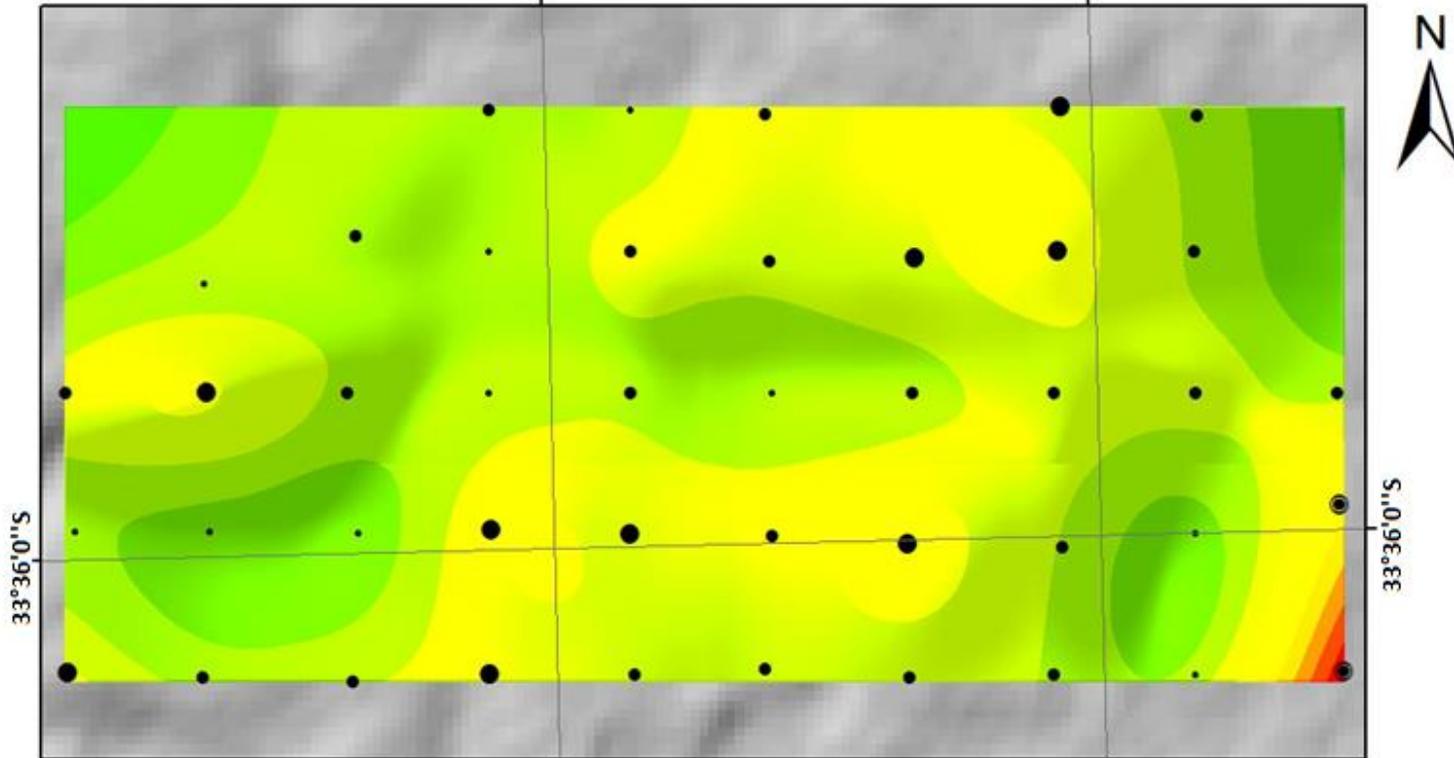


- 1,9-3,4
- 1,5-1,9
- 1,2-1,5
- 1,0-1,2

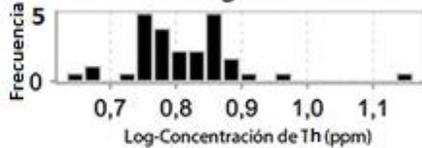


Geoquímica de suelos  
Concentración de Torio (ppm)  
71°33'0"W

71°32'30"W

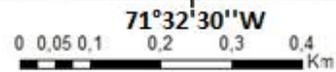


Histograma



- 9,2-14,5
- 7,2-9,2
- 5,8-7,2
- 4,3-5,8

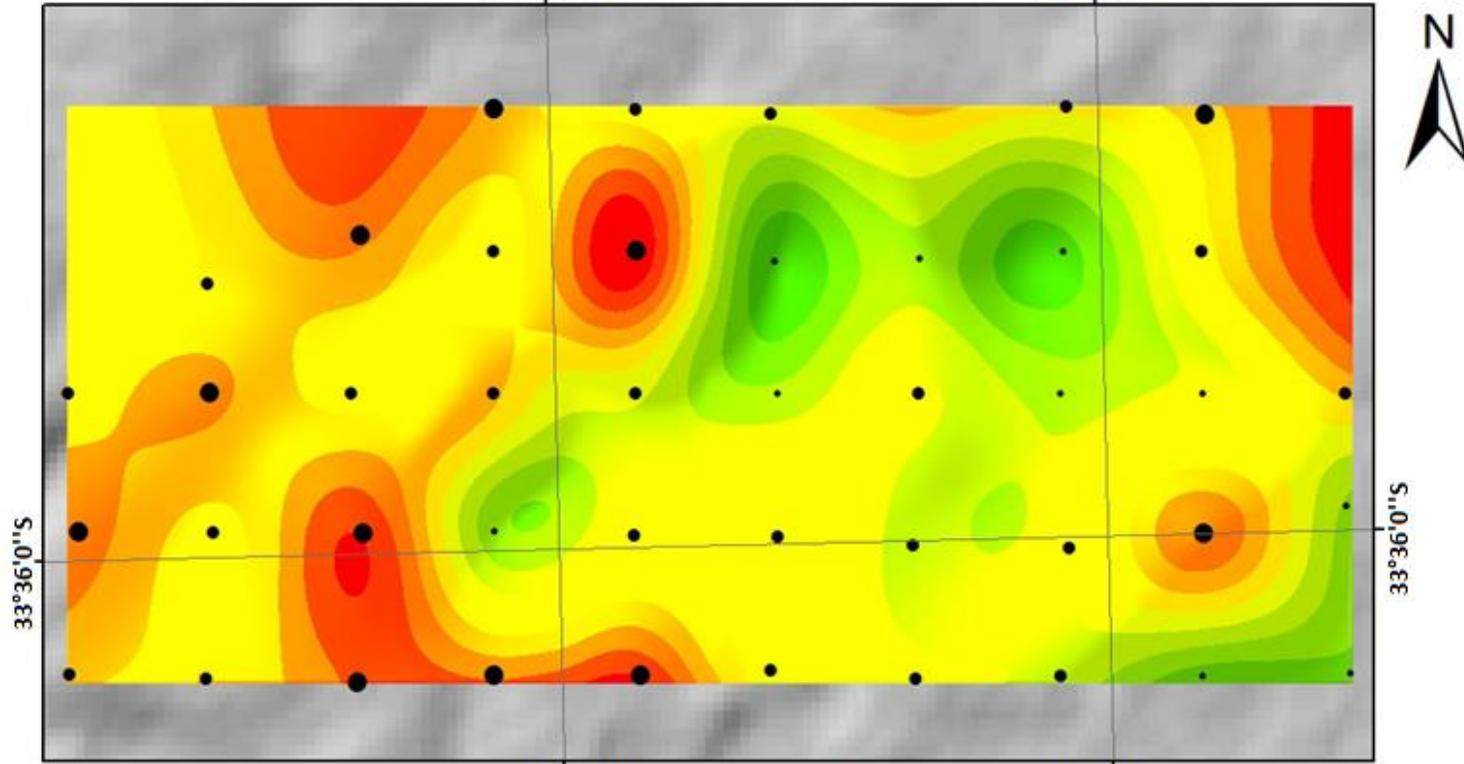
▲ 14,5



4,3 6,2  
Mediana: 14,5  
N° de muestras: 43

Geoquímica de suelos  
Concentración de Estroncio (ppm)  
71°33'0"W

71°32'30"W

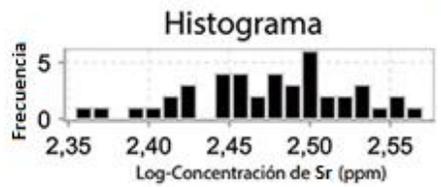


33°36'0"S

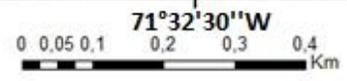
33°36'0"S

71°33'0"W

71°32'30"W

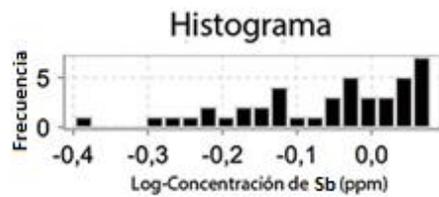
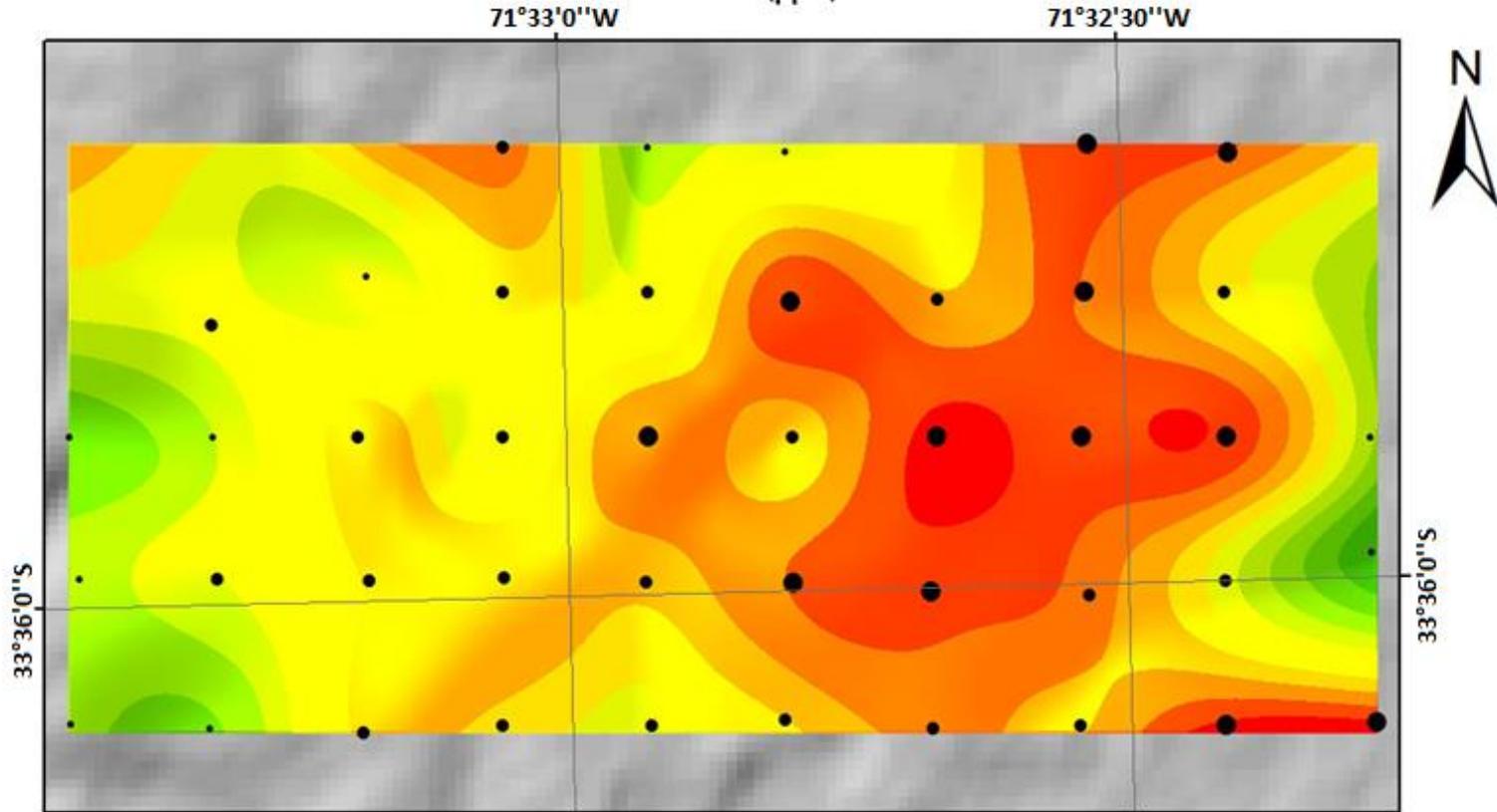


- 323-372
- 278-323
- 226-278

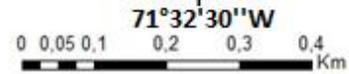


226 372  
Mediana: 304  
N° de muestras: 43

Geoquímica de suelos  
Concentración de Antimonio (ppm)

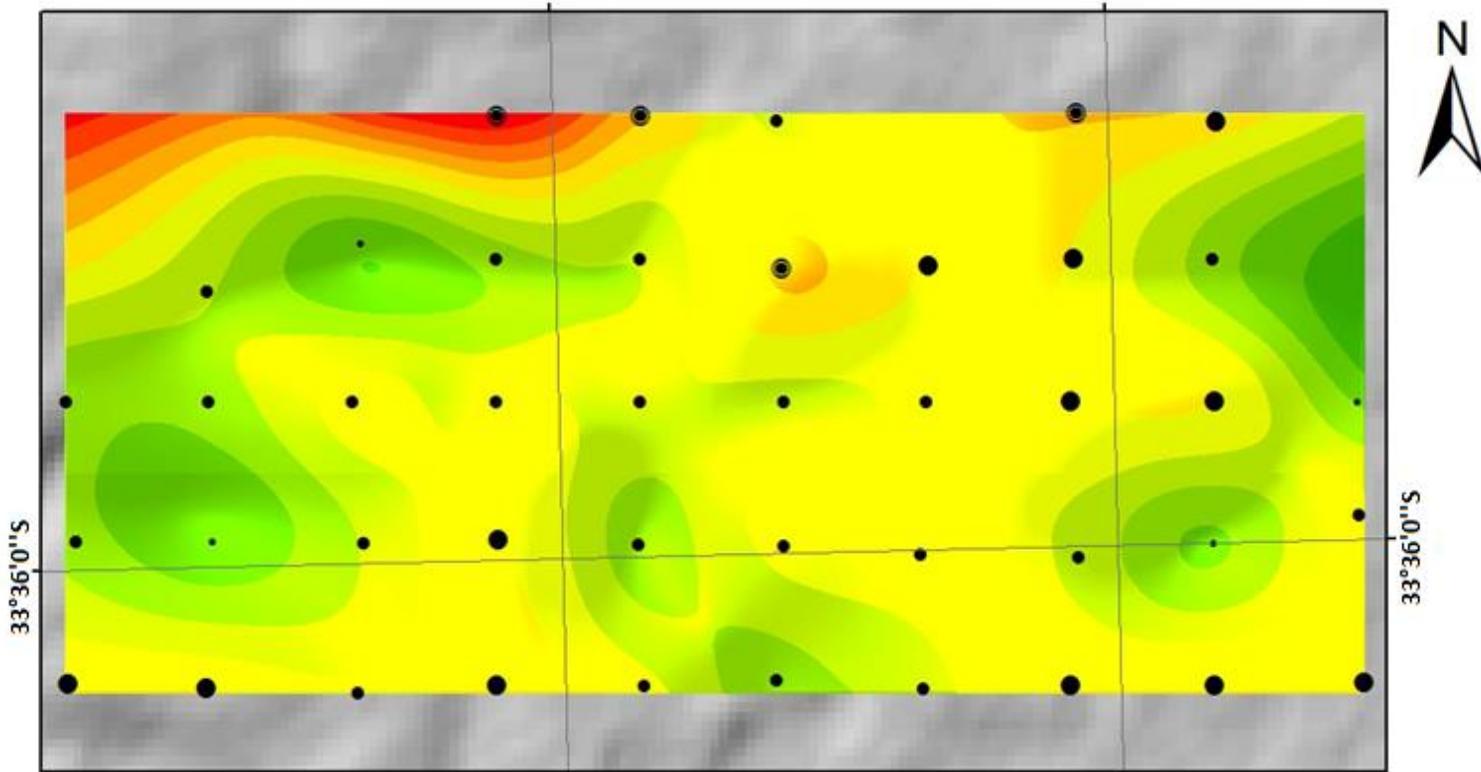


- 1,08-1,2
- 0,73-1,08
- 0,4-0,73



Geoquímica de suelos  
Concentración de Bismuto (ppm)  
71°33'0"W

71°32'30"W



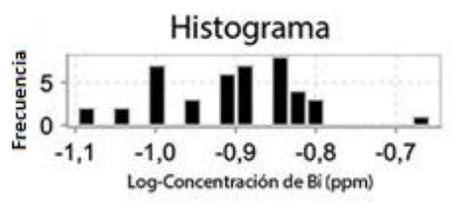
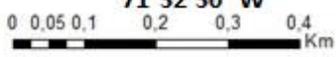
33°36'0\"/>

33°36'0\"/>

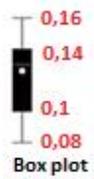
71°33'0\"/>

71°32'30\"/>

○ 0,22

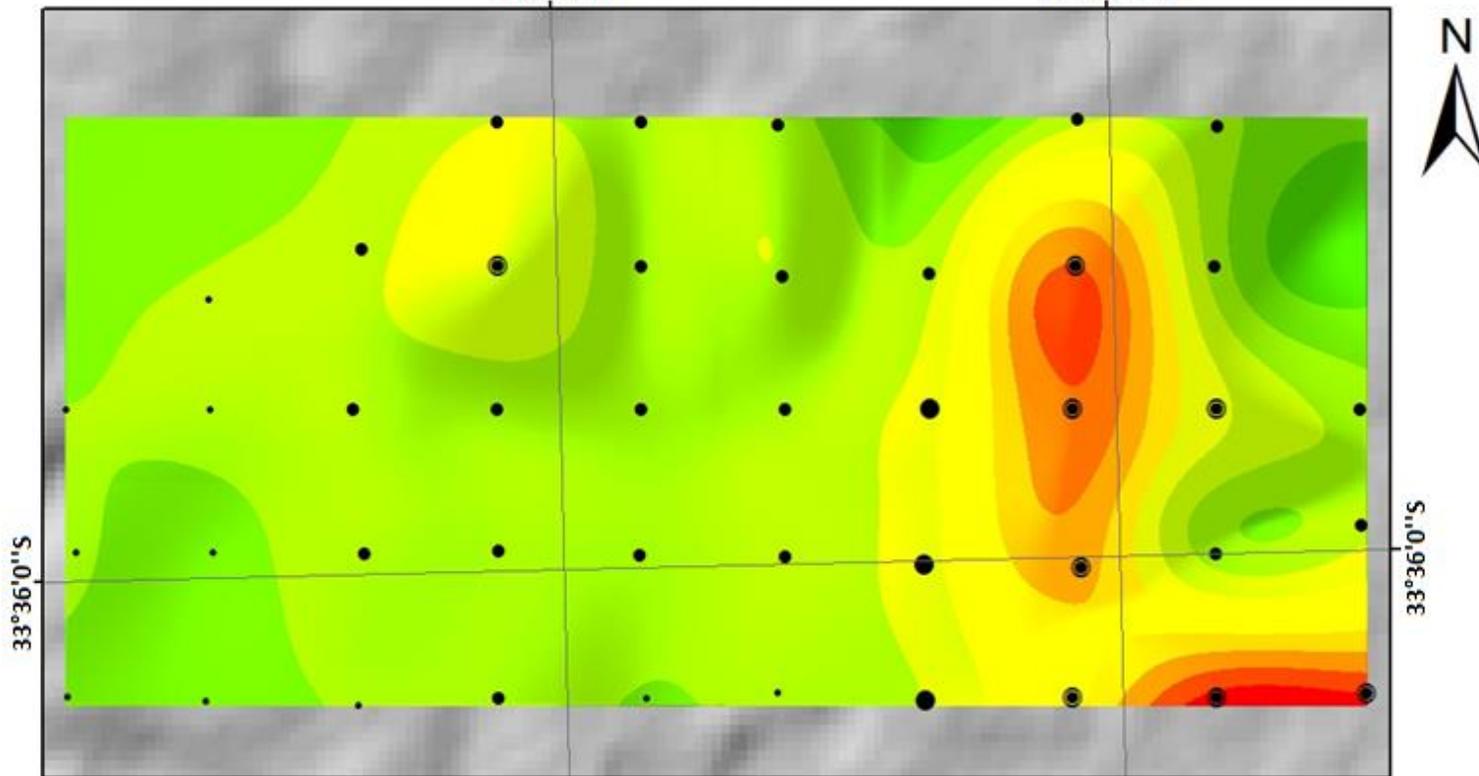


- 0,16-0,22
- 0,14-0,16
- 0,1-0,14
- 0,08-0,1



Geoquímica de suelos  
 Concentración de Vanadio (ppm)  
 71°33'0"W

71°32'30"W

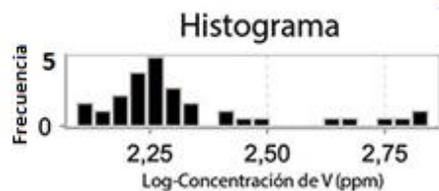


33°36'0\"/>

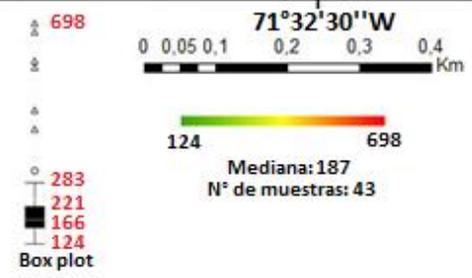
33°36'0\"/>

71°33'0\"/>

71°32'30\"/>

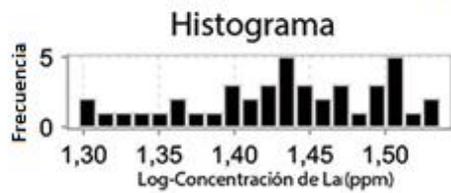
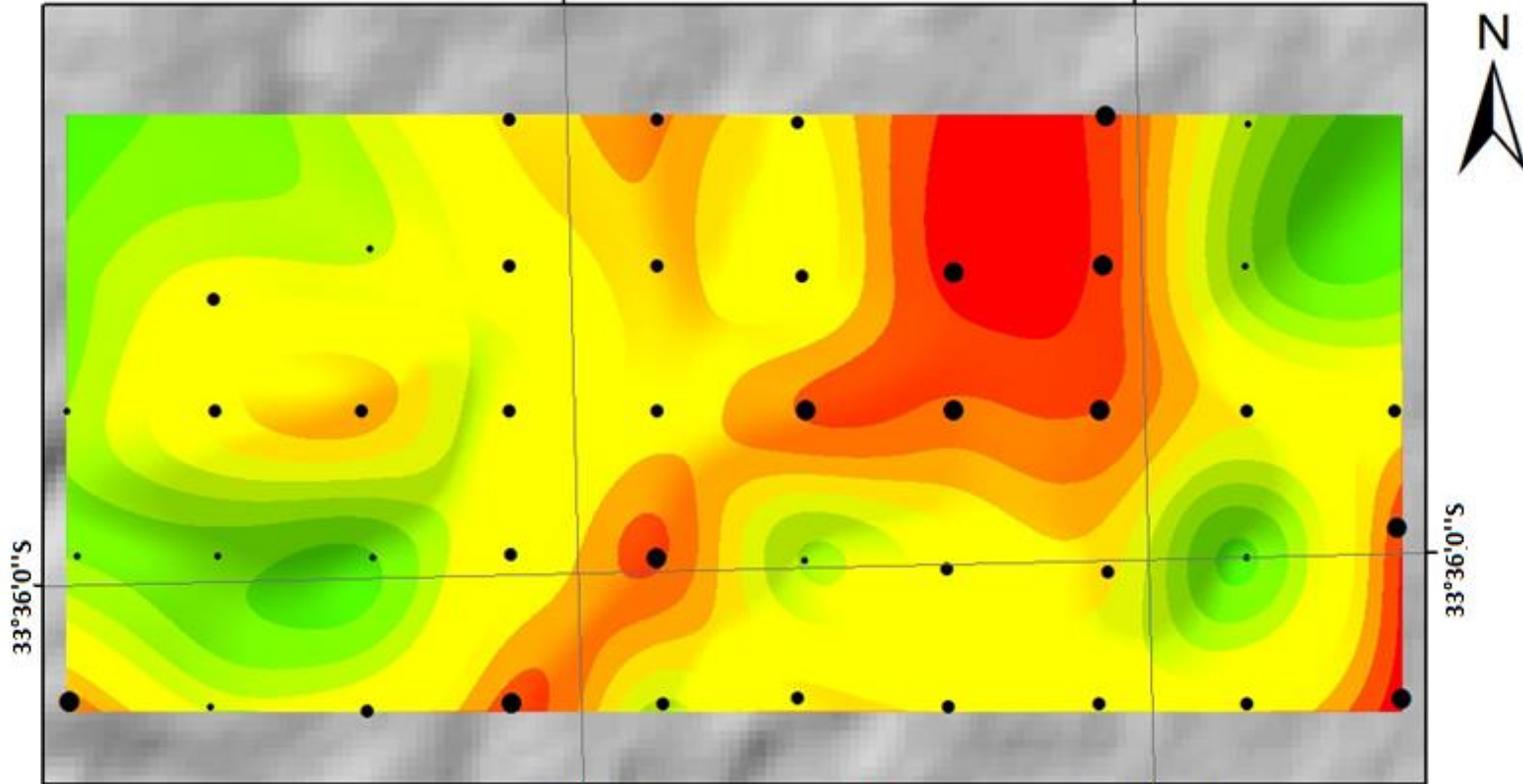


- 283-698
- 221-283
- 166-221
- 124-166

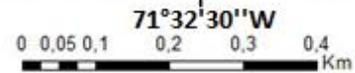


Geoquímica de suelos  
 Concentración de Lantano (ppm)  
 71°33'0"W

71°32'30"W



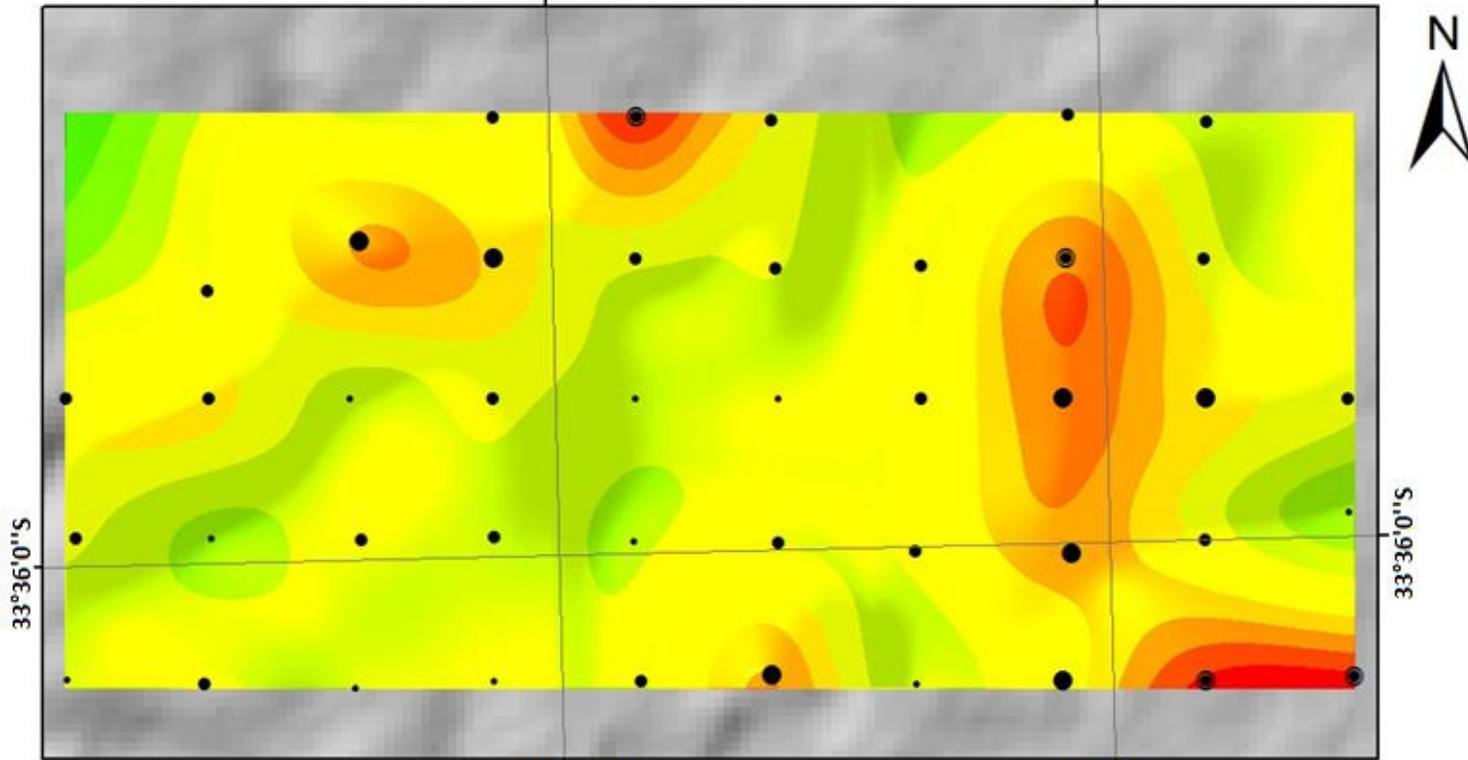
- 31-34,4
- 24,7-31
- 19,8-24,7



19,8 34,4  
 Mediana: 27,2  
 N° de muestras: 43

Geoquímica de suelos  
Concentración de Cromo (ppm)  
71°33'0"W

71°32'30"W

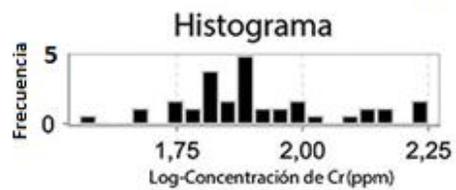


33°36'0\"S

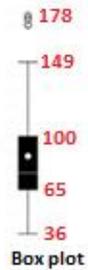
33°36'0\"S

71°33'0\"W

71°32'30\"W



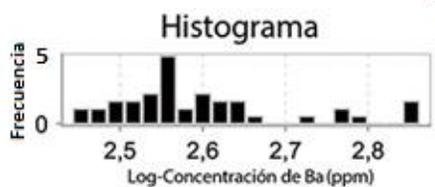
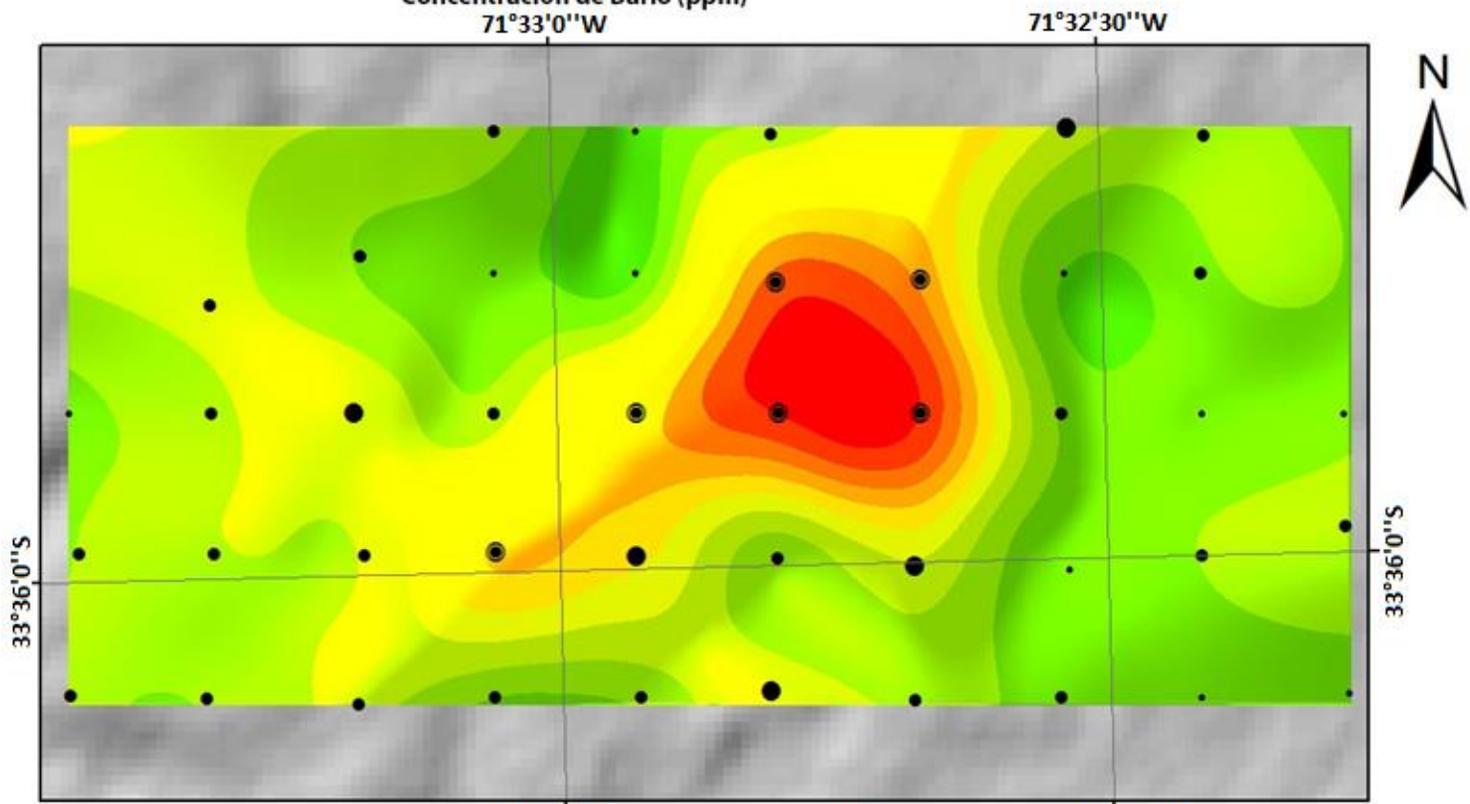
- 149-178
- 100-149
- 65-100
- 36-65



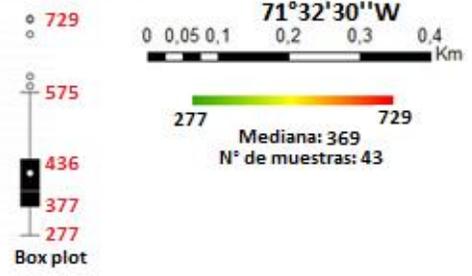
0 0,05 0,1 0,2 0,3 0,4 Kilometers

36 178  
Mediana: 76  
N° de muestras: 43

Geoquímica de suelos  
Concentración de Bario (ppm)

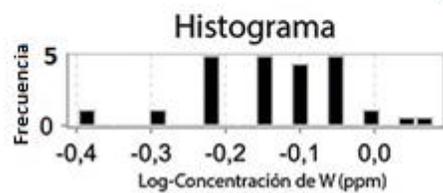
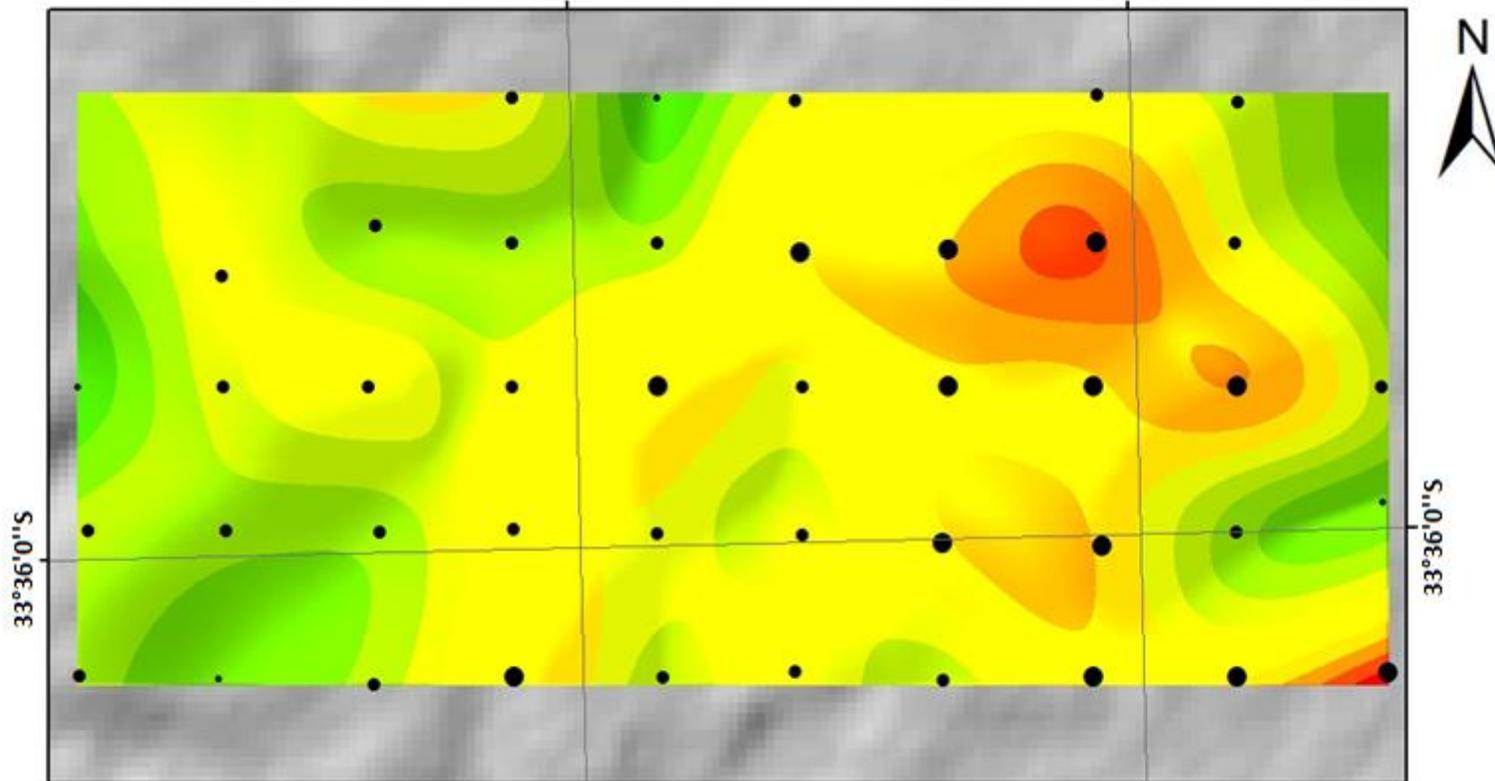


- 575-729
- 436-575
- 337-436
- 277-337

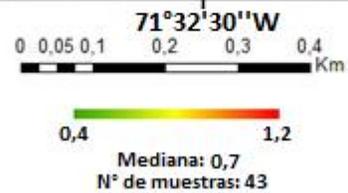
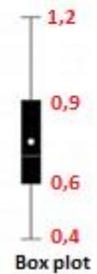


Geoquímica de suelos  
Concentración de Wolframio (ppm)  
71°33'0"W

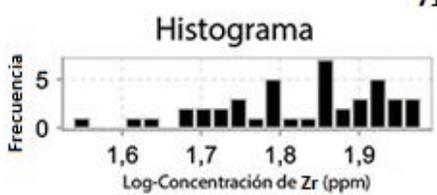
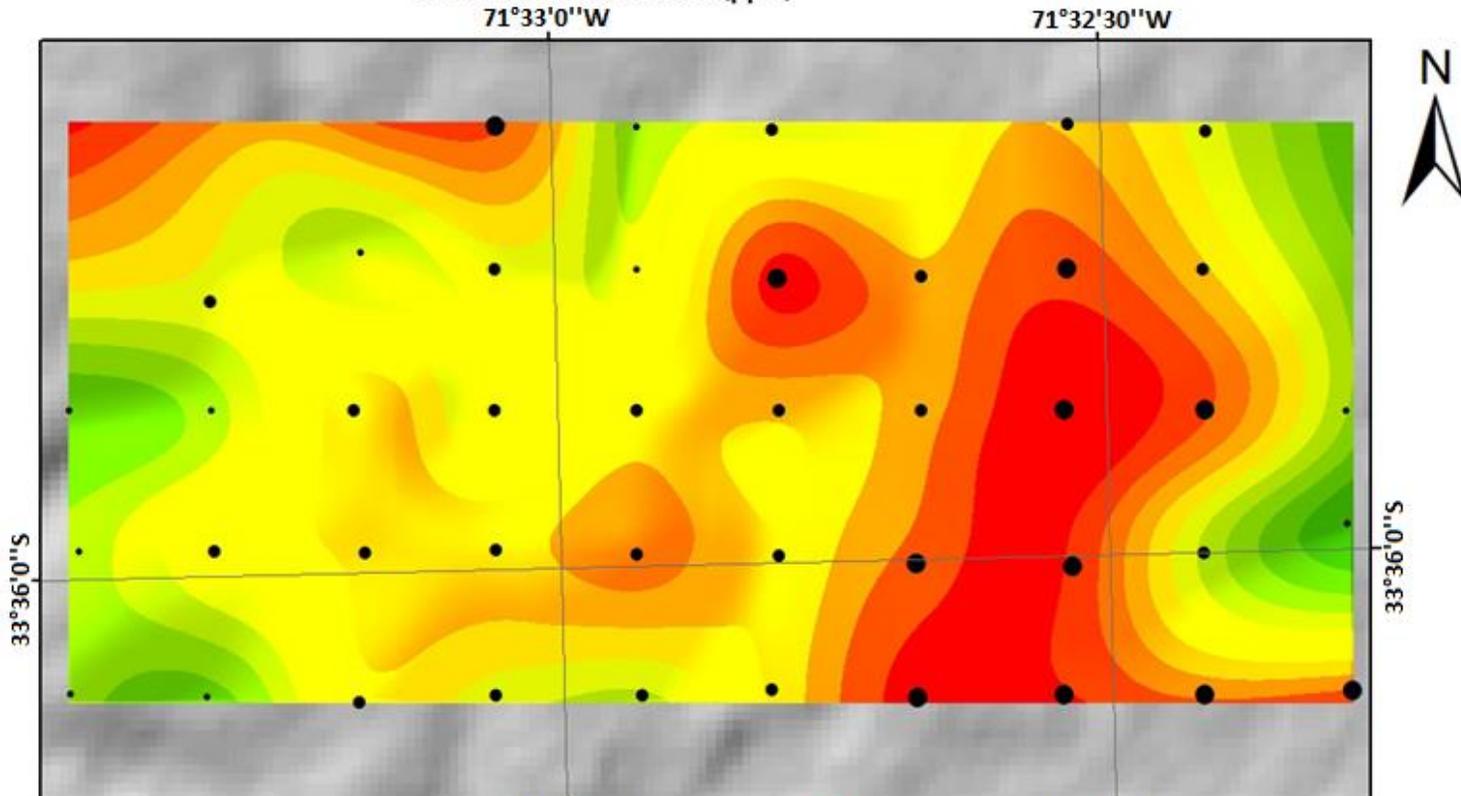
71°32'30"W



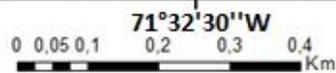
- 0,9-1,2
- 0,6-0,9
- 0,4-0,6



Geoquímica de suelos  
Concentración de Zirconio (ppm)

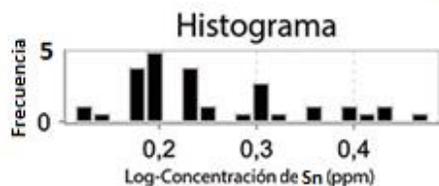
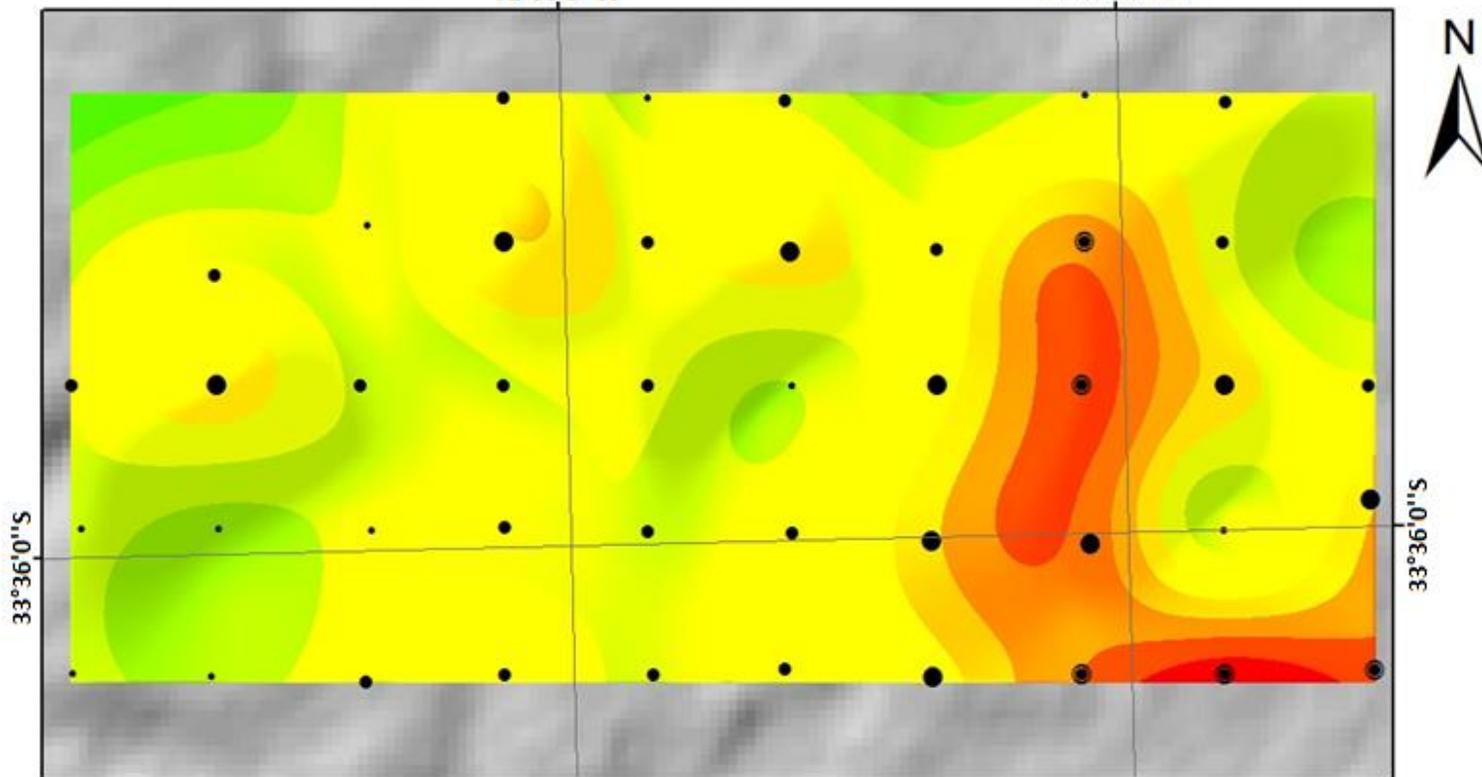


- 82-95,2
- 55,6-82
- 34,5-55,6

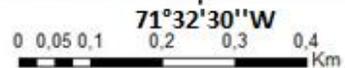


Geoquímica de suelos  
Concentración de Estaño (ppm)  
71°33'0"W

71°32'30"W

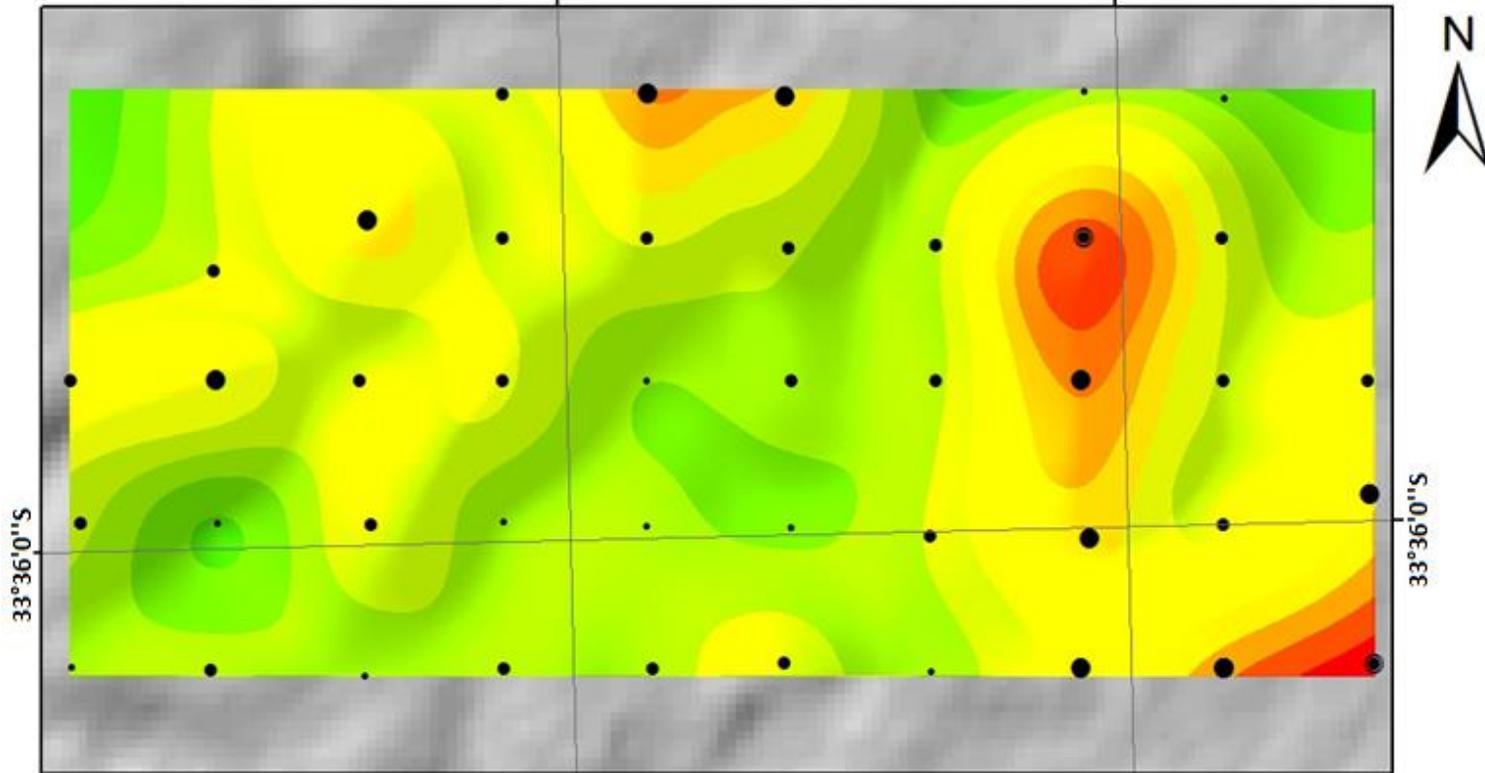


- 2.5-3.0
- 2.0-2.5
- 1.6-2.0
- 1.3-1.6



Geoquímica de suelos  
 Concentración de Escandio (ppm)  
 71°33'0"W

71°32'30"W

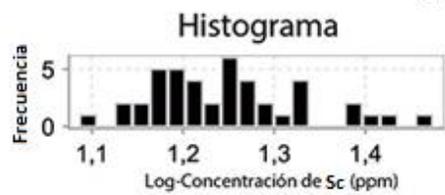


33°36'0"S

33°36'0"S

71°33'0"W

71°32'30"W

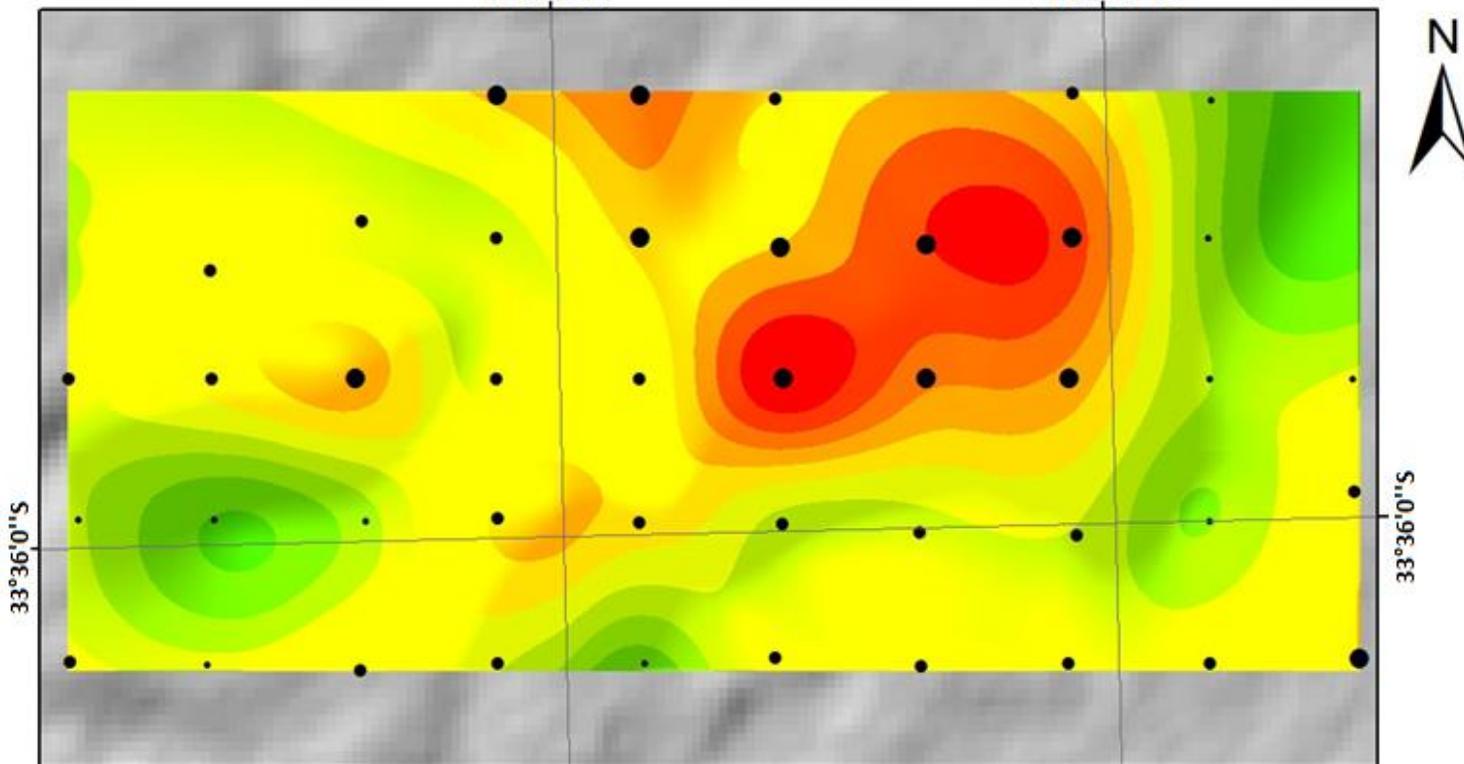


- 25,5-29,8
- 19,8-25,5
- 15,3-19,8
- 12,2-15,3



Geoquímica de suelos  
Concentración de Itrio (ppm)  
71°33'0"W

71°32'30"W

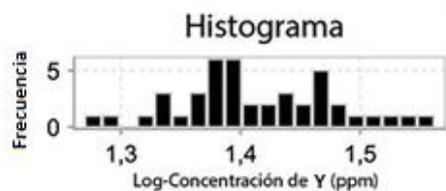


33°36'0"S

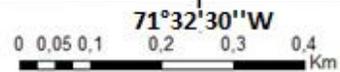
33°36'0"S

71°33'0"W

71°32'30"W

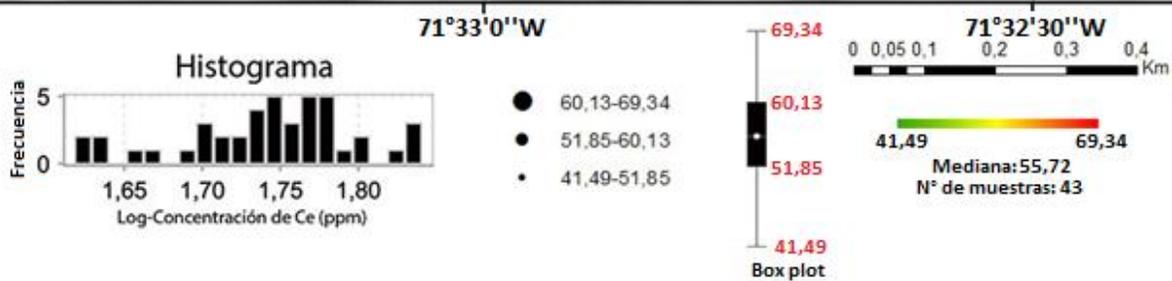
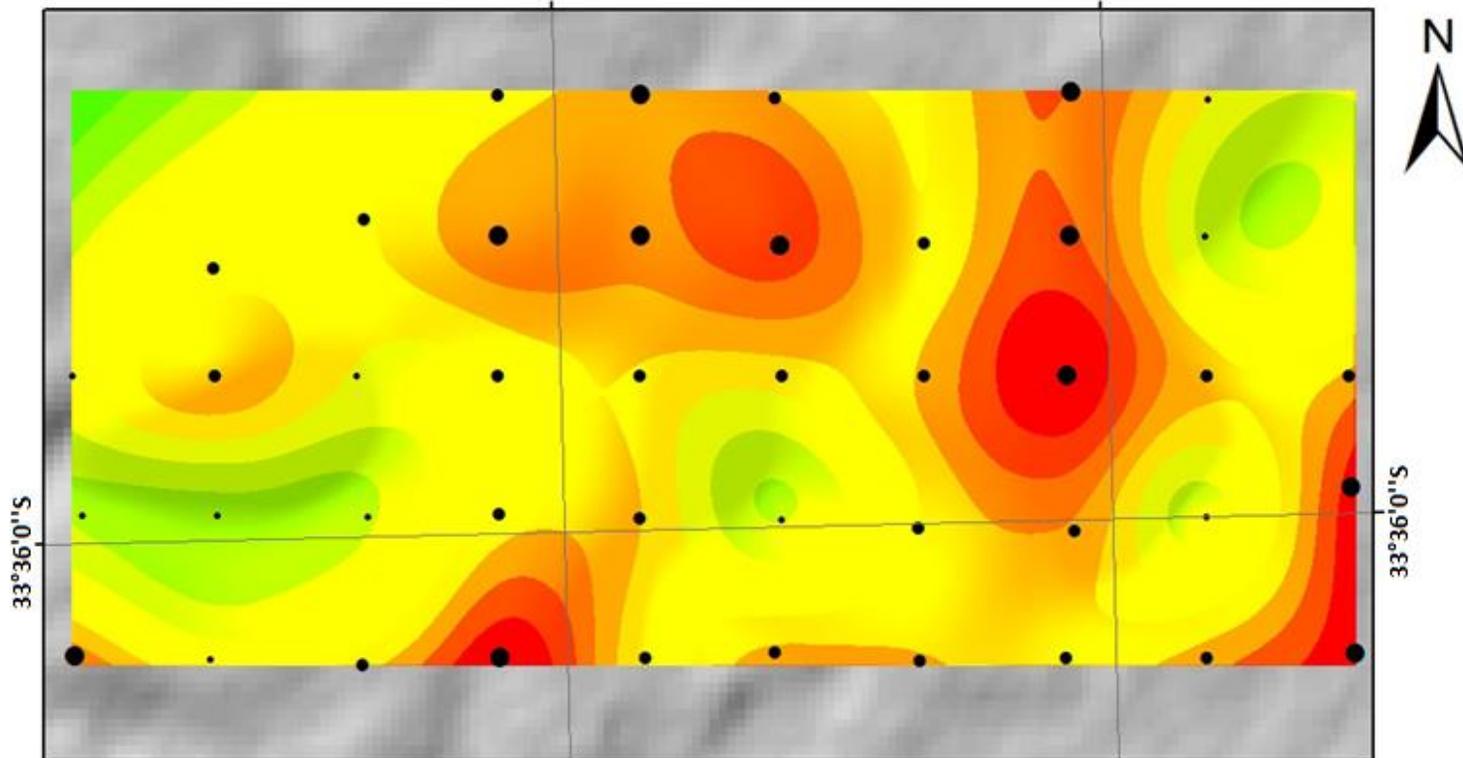


- 29,2-36,5
- 23,6-29,2
- 18,6-23,6



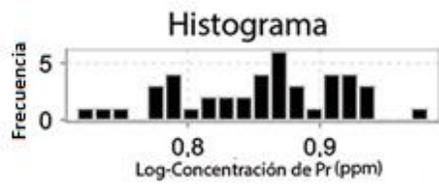
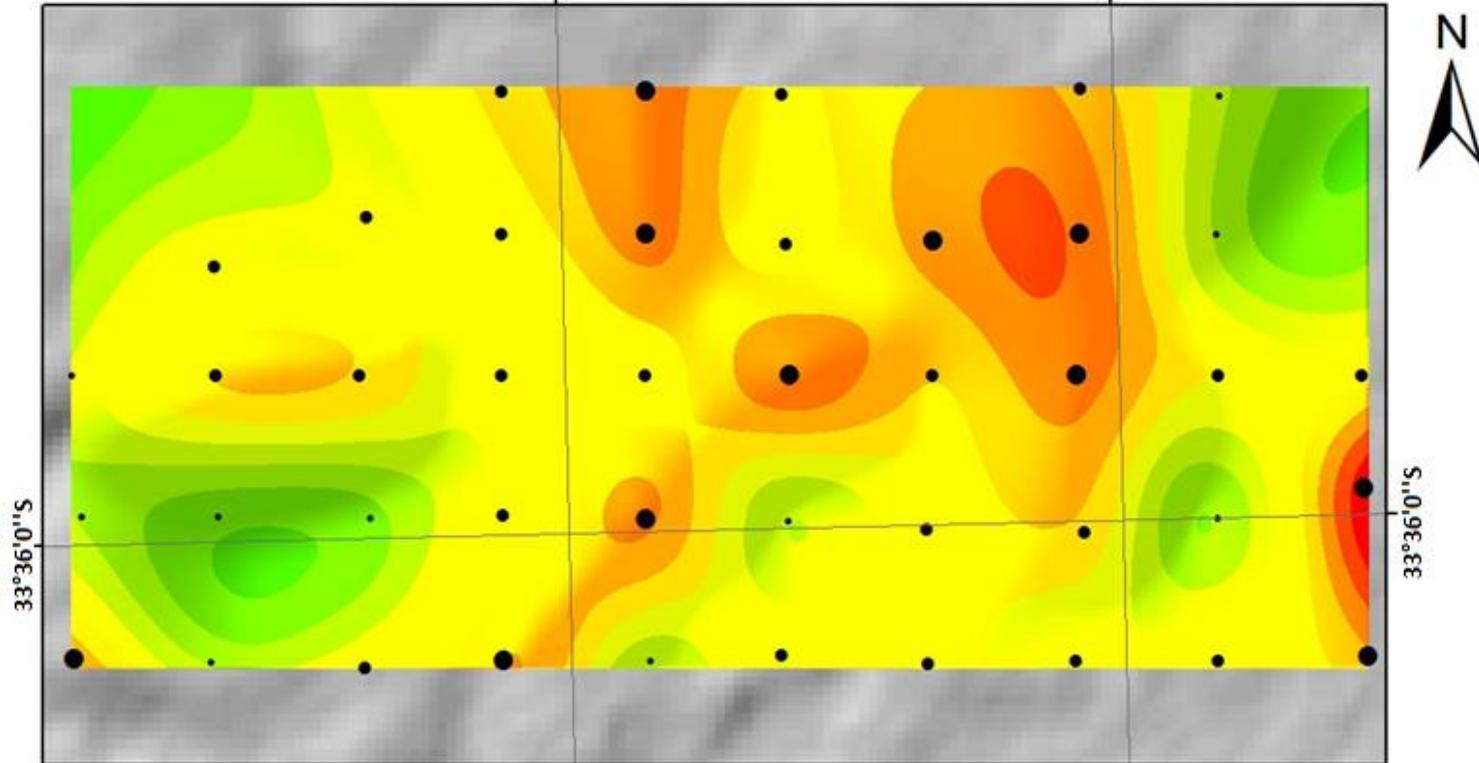
Geoquímica de suelos  
 Concentración de Cerio (ppm)  
 71°33'0"W

71°32'30"W

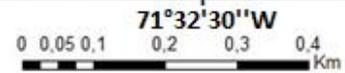
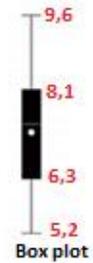


Geoquímica de suelos  
 Concentración de Praseodimio (ppm)  
 71°33'0"W

71°32'30"W



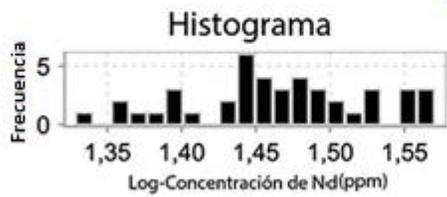
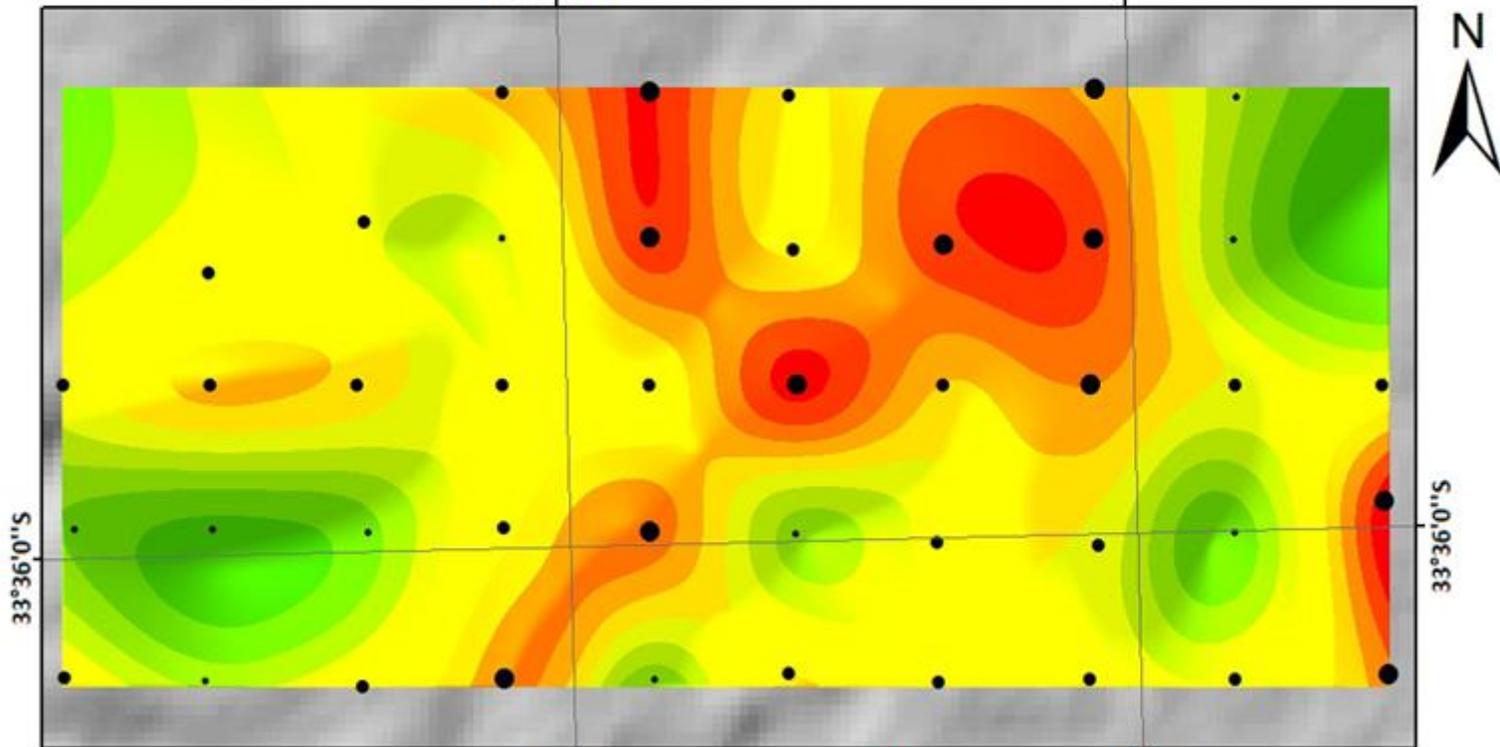
- 8,1-9,6
- 6,3-8,1
- 5,2-6,3



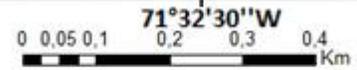
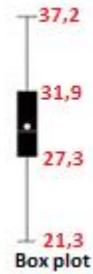
5,2 9,6  
 Mediana: 7,4  
 N° de muestras: 43

Geoquímica de suelos  
Concentración de Neodimio (ppm)

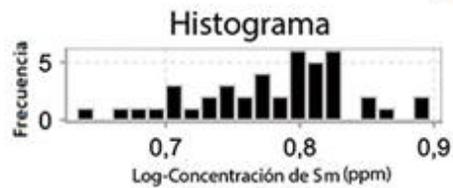
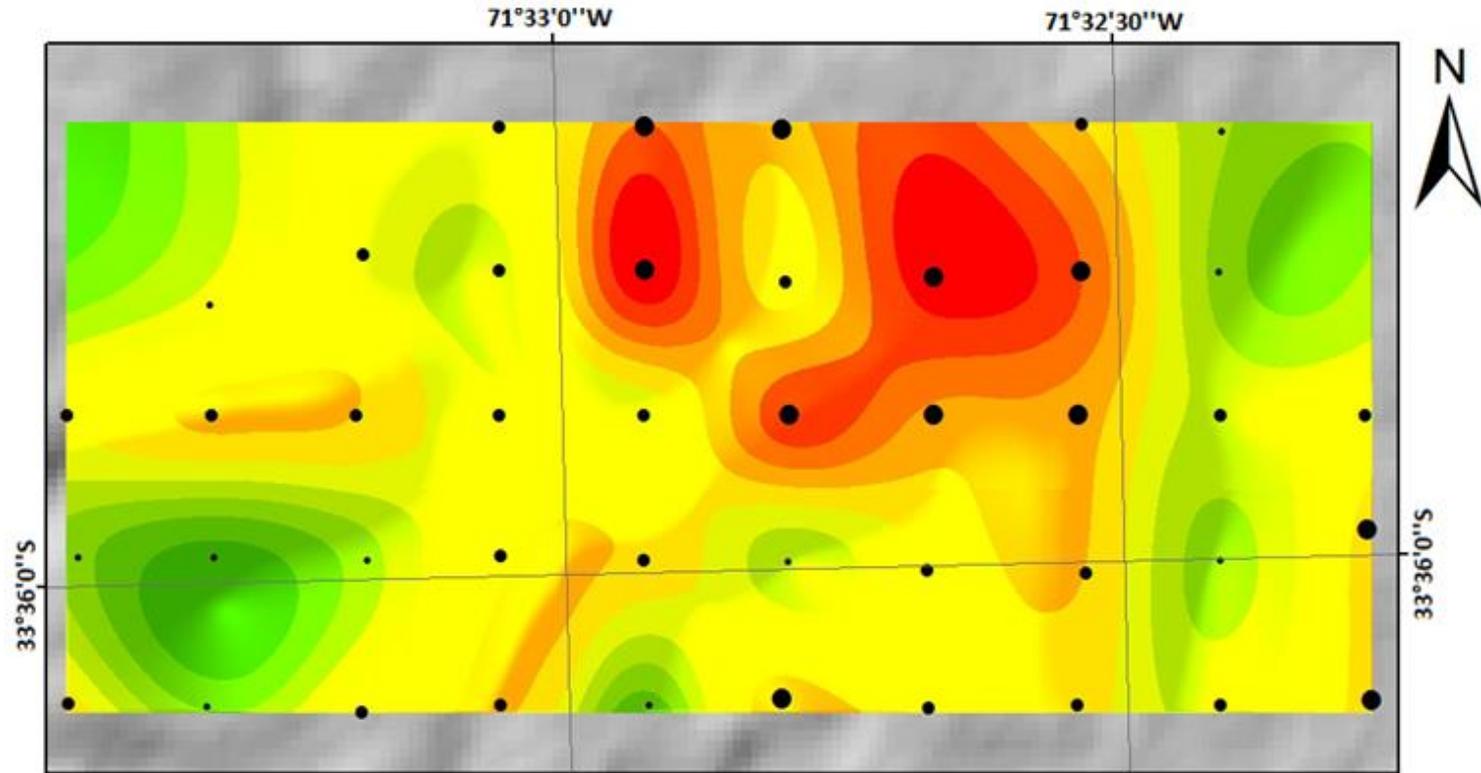
71°33'0"W



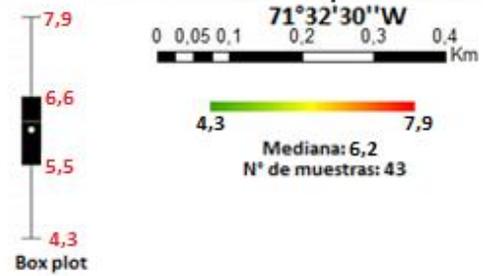
- 31,9-37,2
- 27,3-31,9
- 21,3-27,3



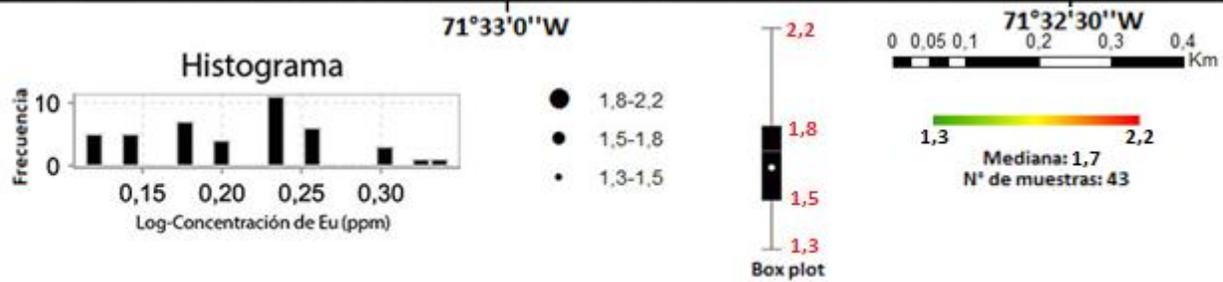
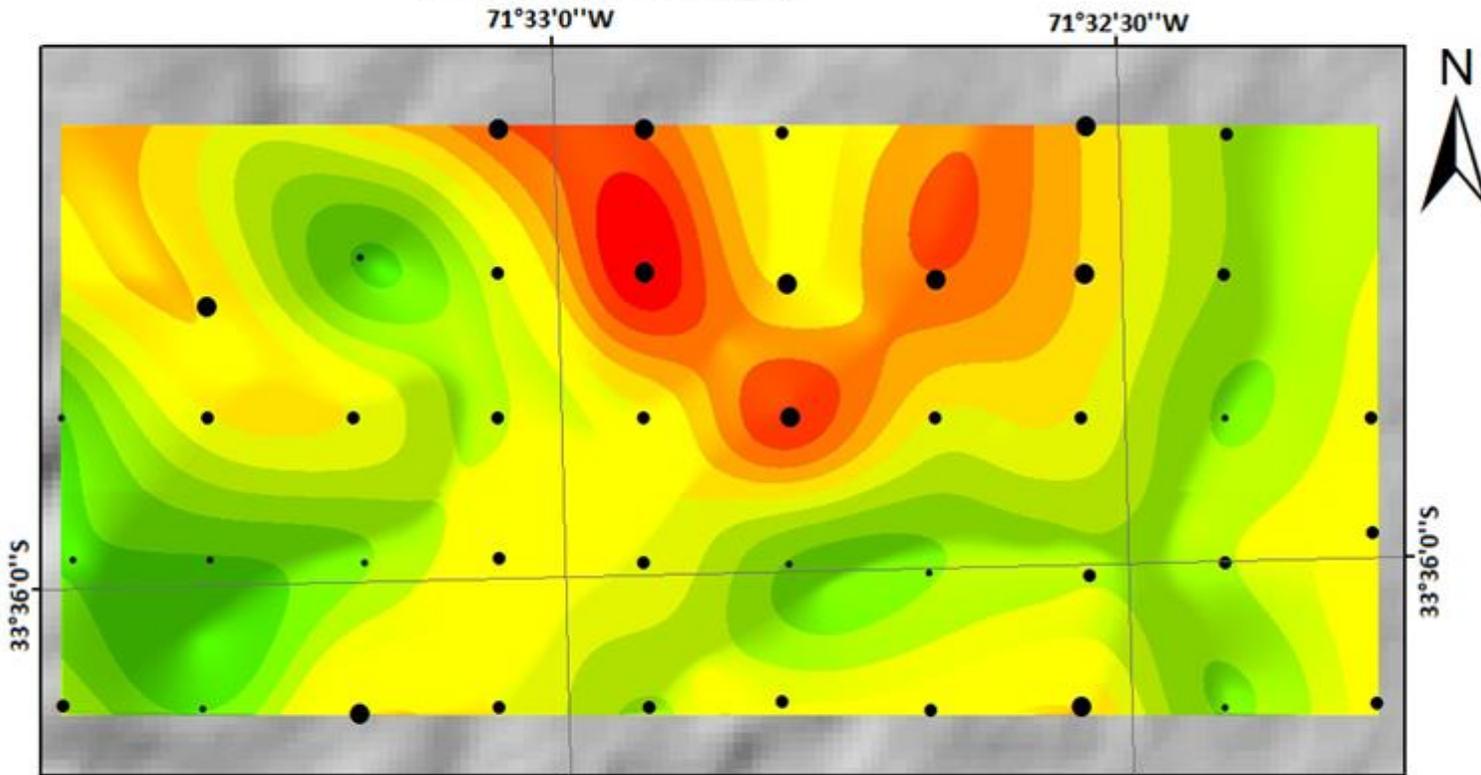
Geoquímica de suelos  
Concentración de Samario (ppm)



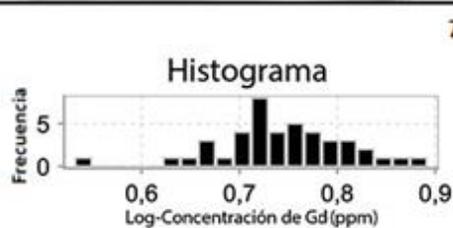
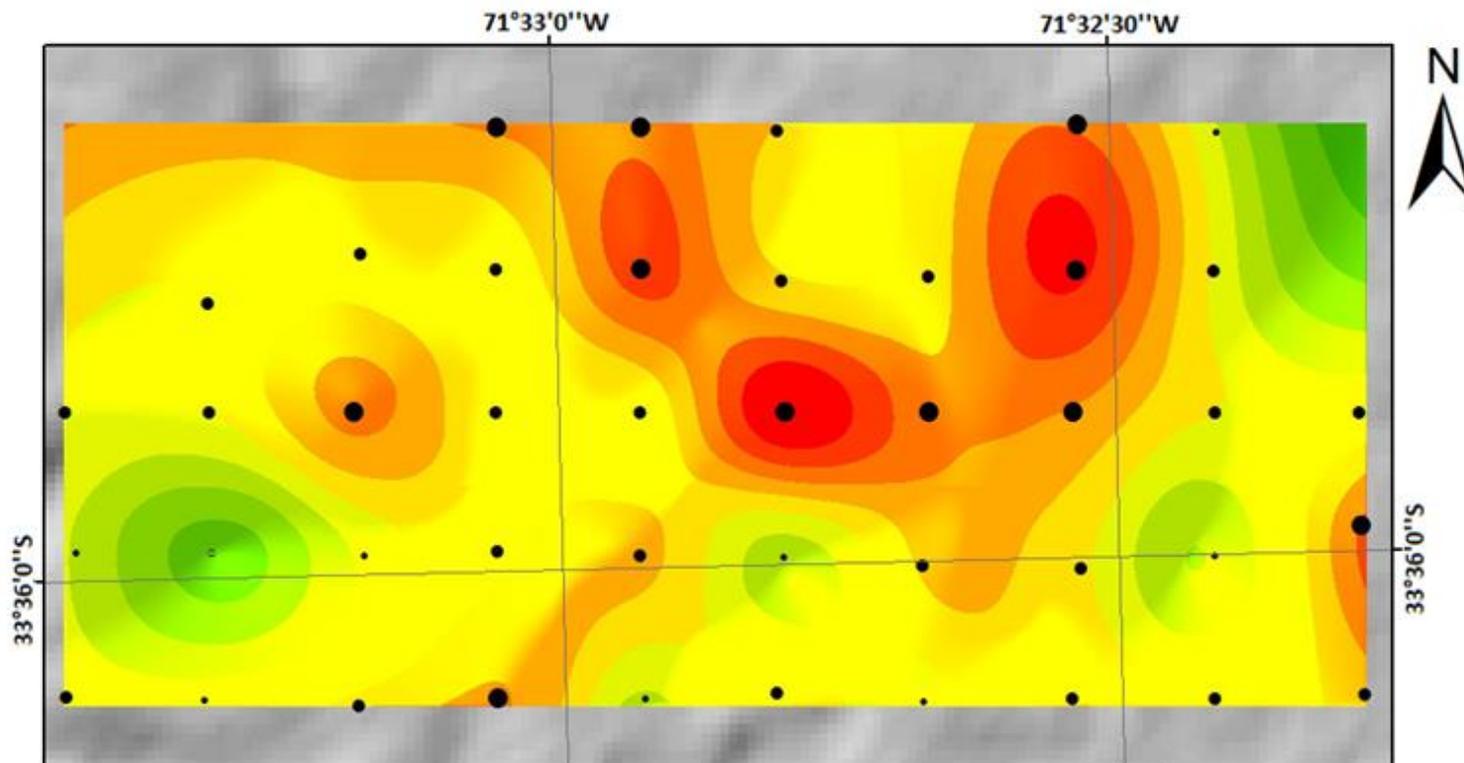
- 6,6-7,9
- 5,5-6,6
- 4,3-5,5



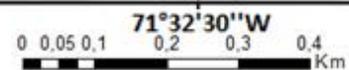
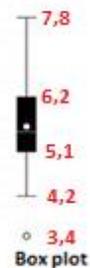
Geoquímica de suelos  
Concentración de Europio (ppm)



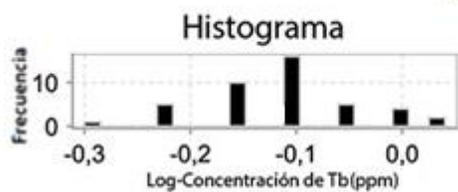
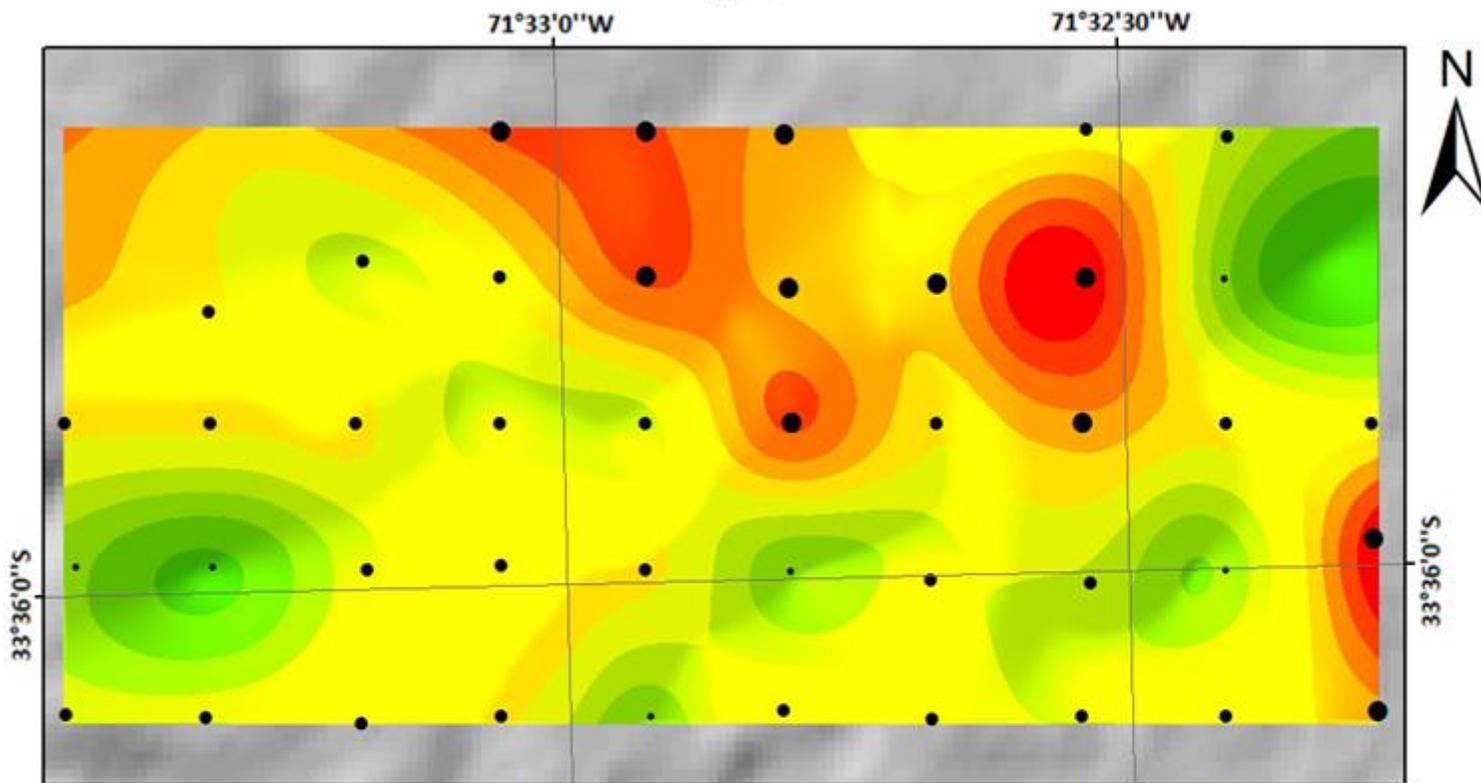
Geoquímica de suelos  
Concentración de Gadolinio (ppm)



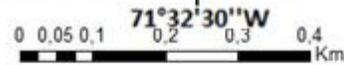
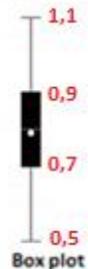
- 6,2-7,8
- 5,1-6,2
- 4,2-5,1
- 3,4-4,2



Geoquímica de suelos  
Concentración de Terbio (ppm)

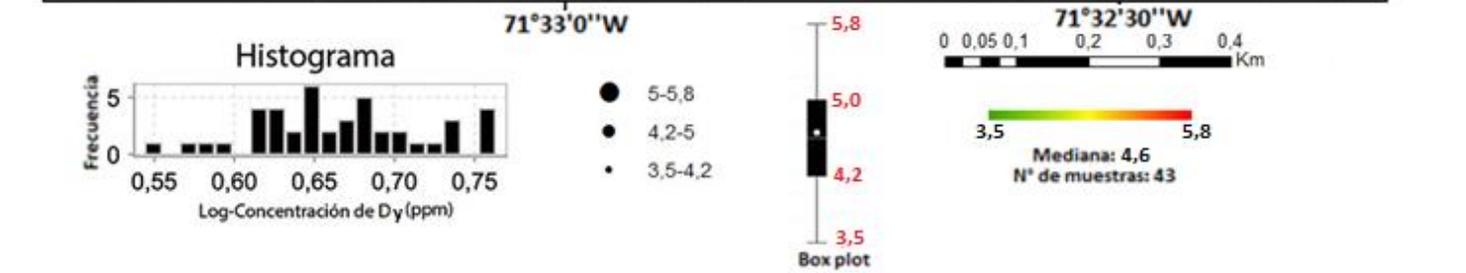
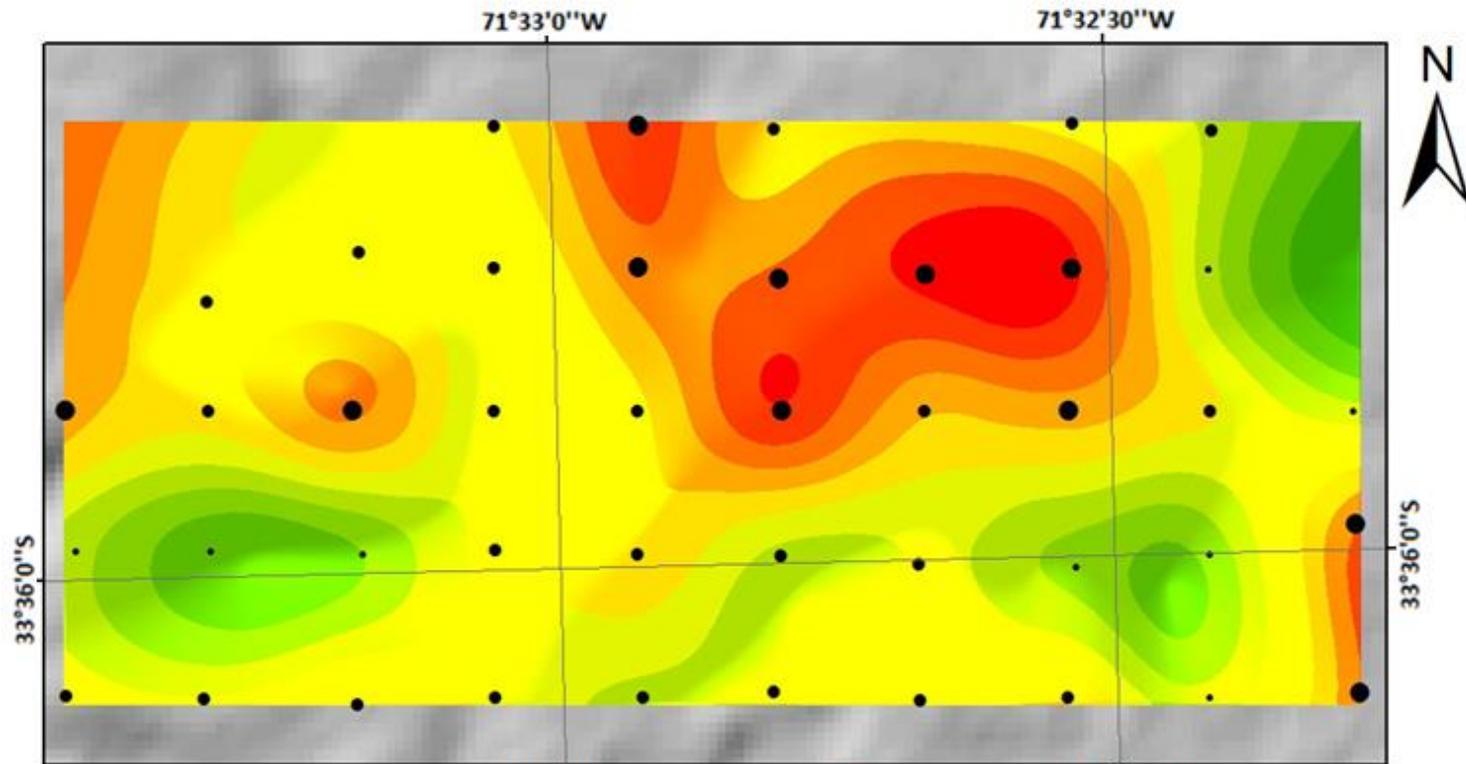


- 0,9-1,1
- 0,7-0,9
- 0,5-0,7

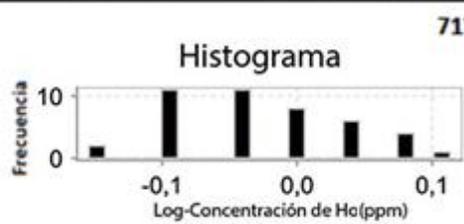
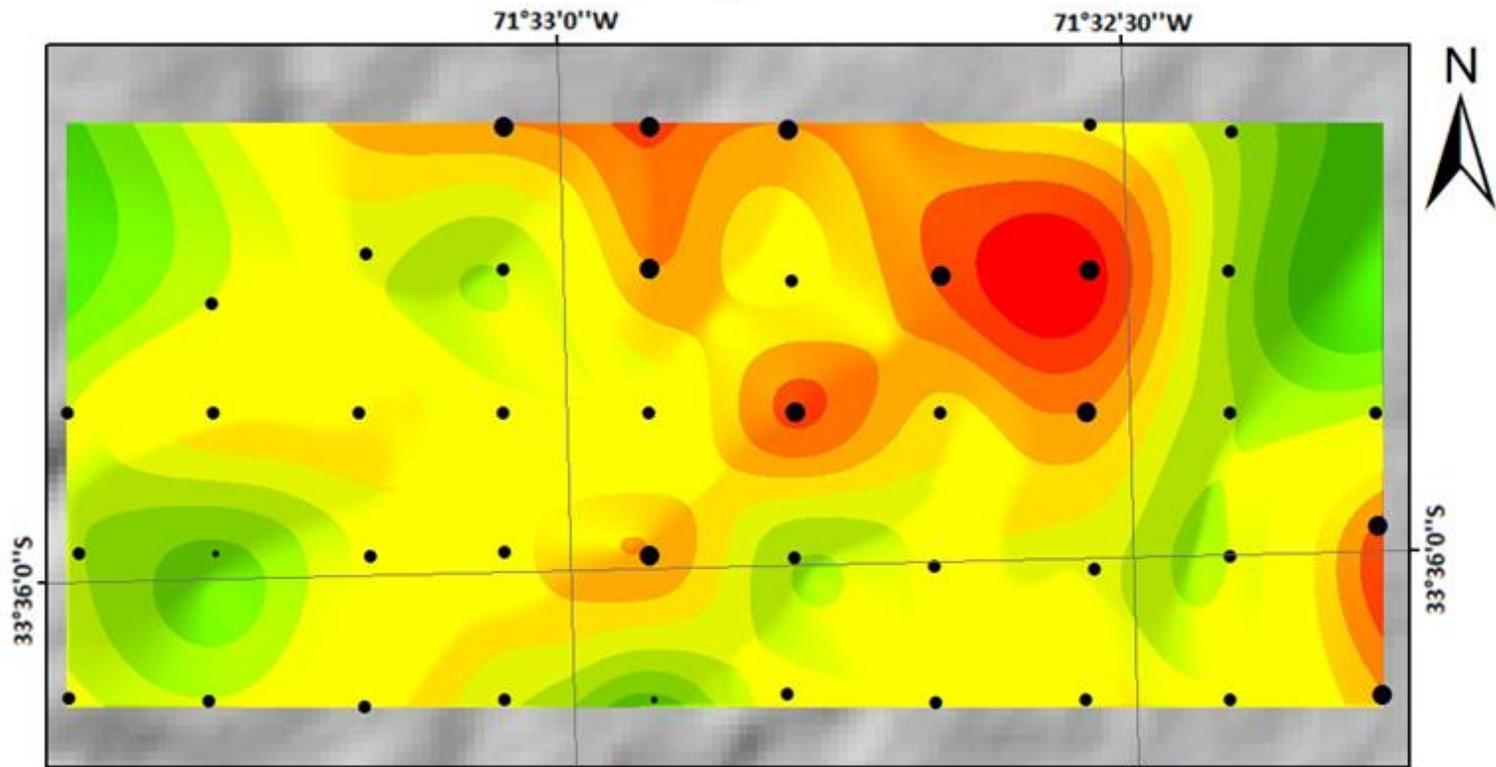


0,7 1,1  
Mediana: 0,8  
N° de muestras: 43

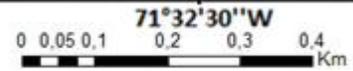
Geoquímica de suelos  
Concentración de Disprosio (ppm)



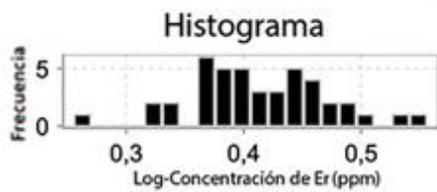
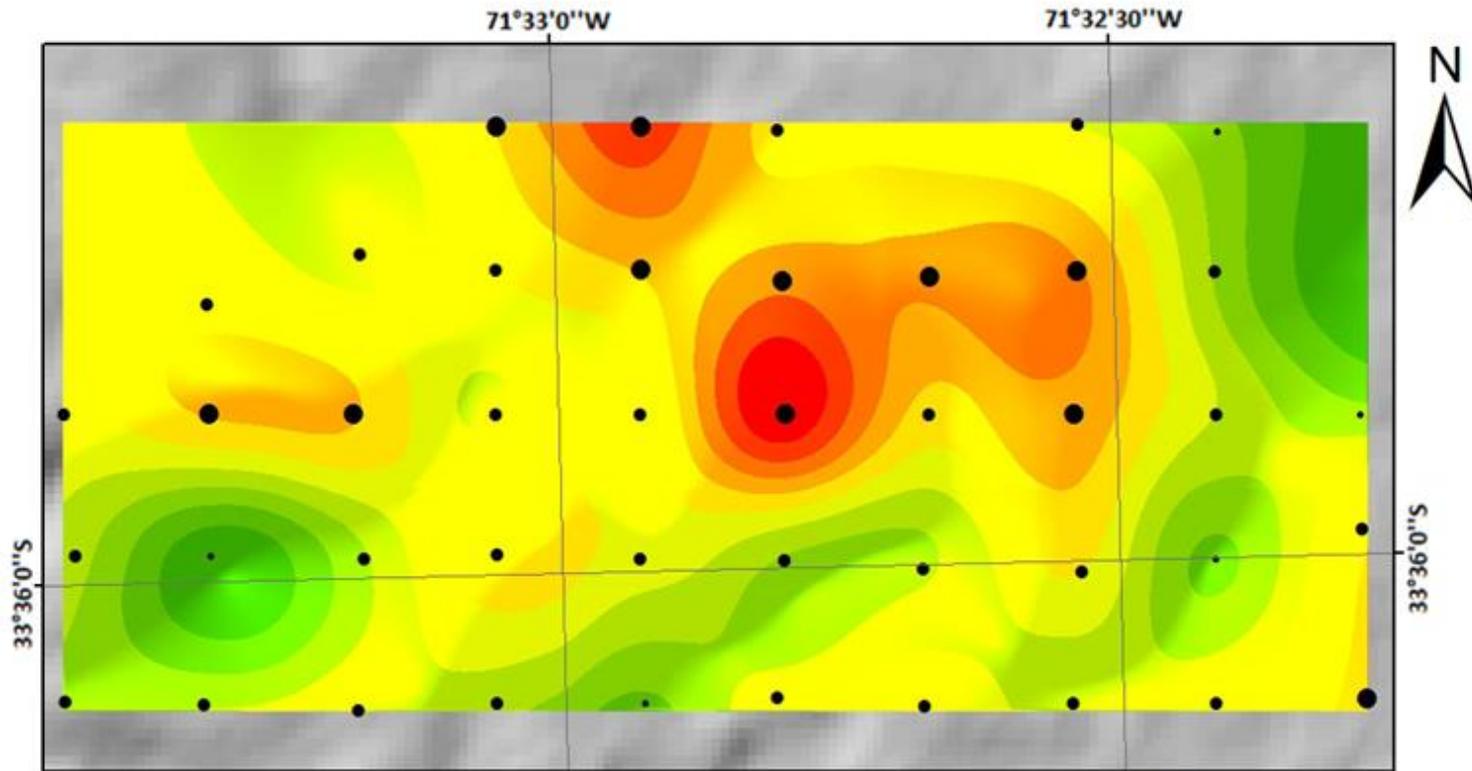
# Geoquímica de suelos Concentración e Holmio (ppm)



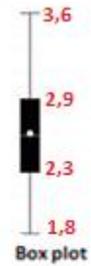
- 1,1-1,3
- 0,8-1,1
- 0,7-0,8



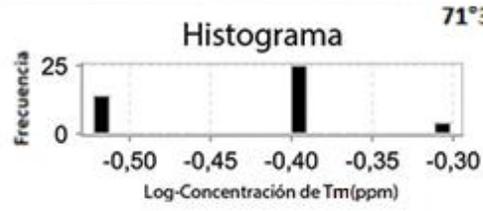
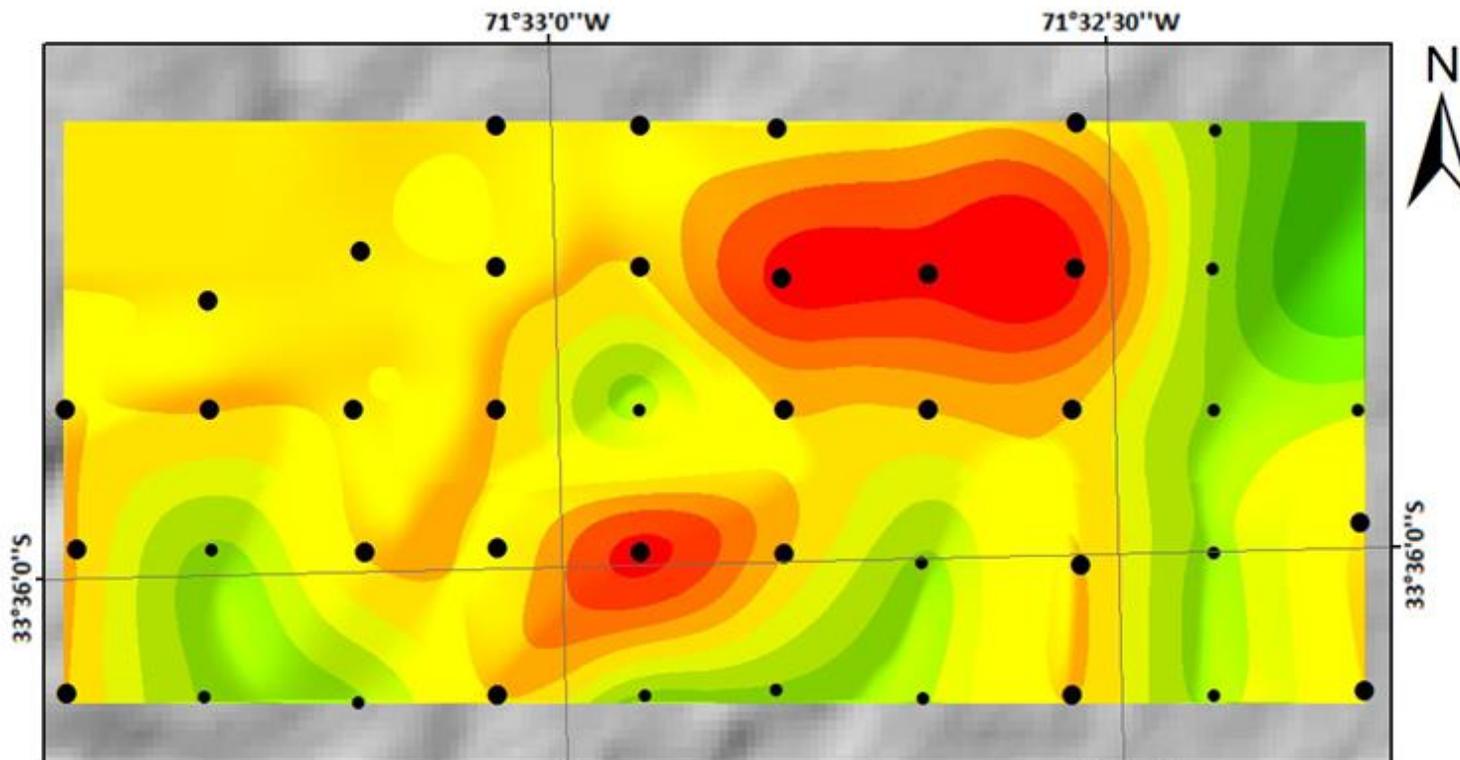
Geoquímica de suelos  
Concentración de Erblio (ppm)



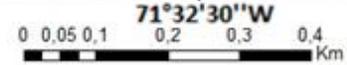
- 2,9-3,6
- 2,3-2,9
- 1,8-2,3



Goquímica de suelos  
Concentración de Tulio (ppm)



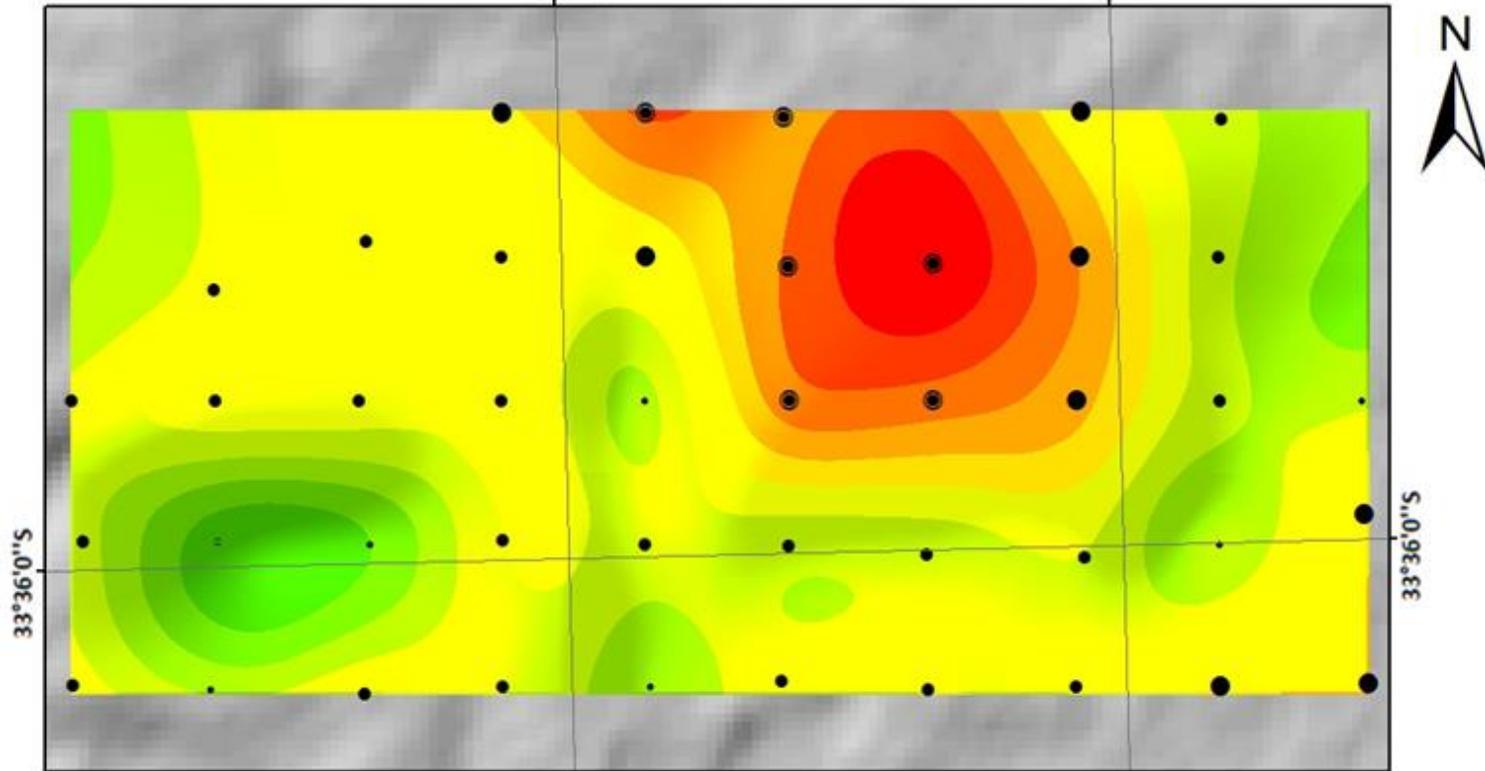
- 0,4-0,5
- 0,3-0,4



0,3 0,4  
Mediana: 0,4  
N° de muestras: 43

Geoquímica de suelos  
 Concentración de Iterbio (ppm)  
 71°33'0"W

71°32'30"W

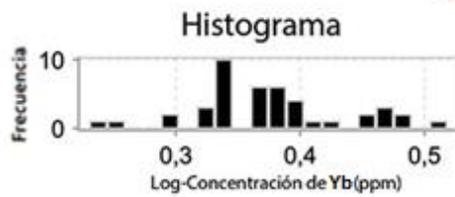


33°36'0"S

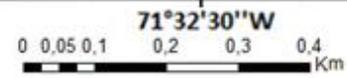
33°36'0"S

71°33'0"W

71°32'30"W

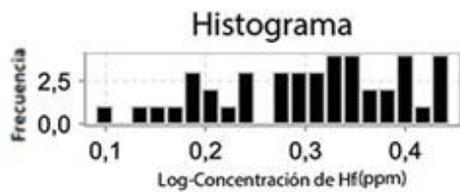
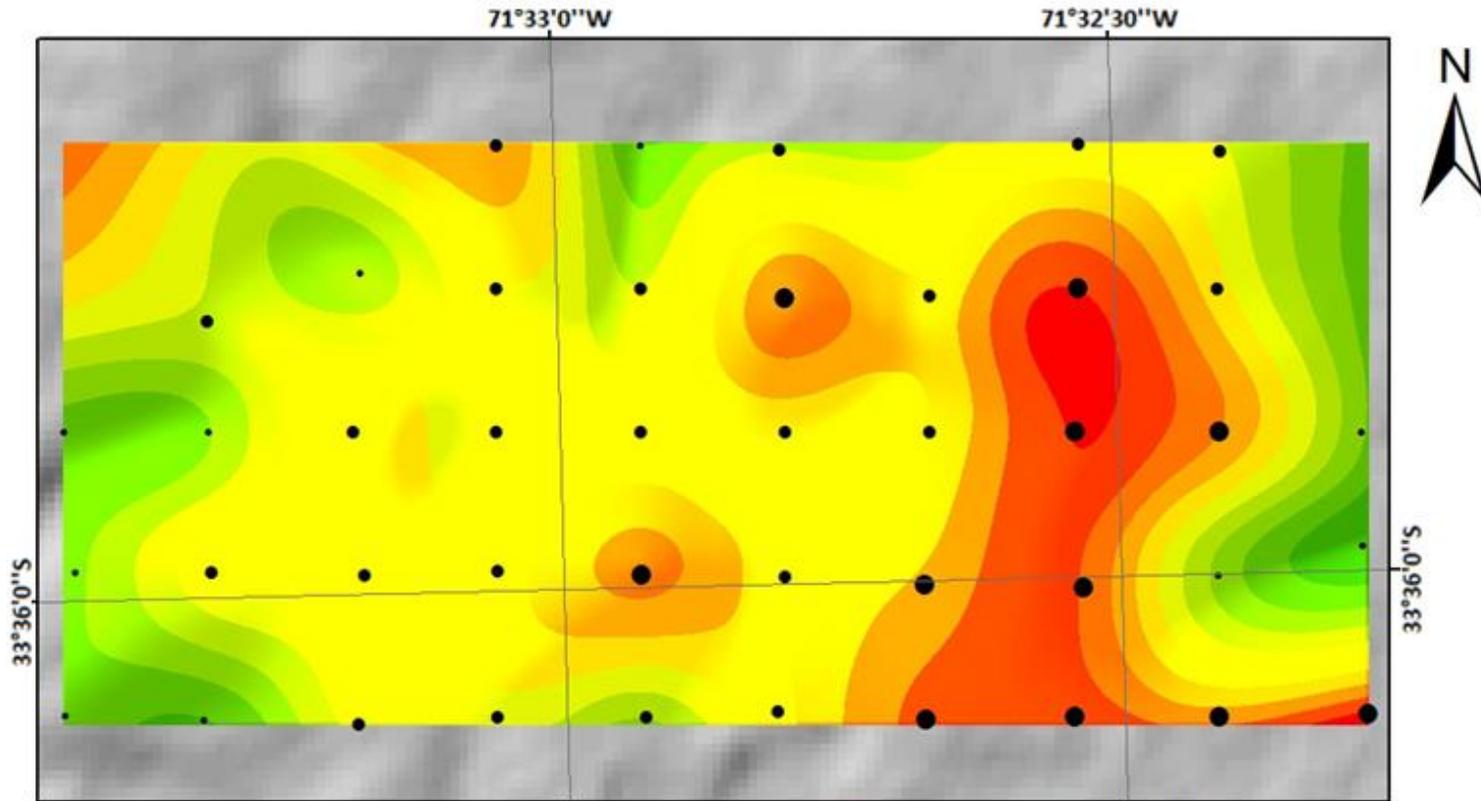


- 2,9-3,3
- 2,5-2,9
- 2,2-2,5
- 1,8-2,2
- 1,7-1,8

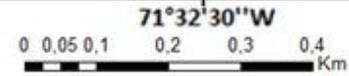


Mediana: 2,3  
 N° de muestras: 43

Geoquímica de suelos  
Concentración de Hafnio (ppm)

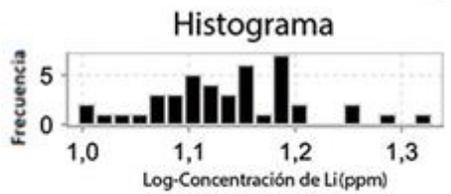
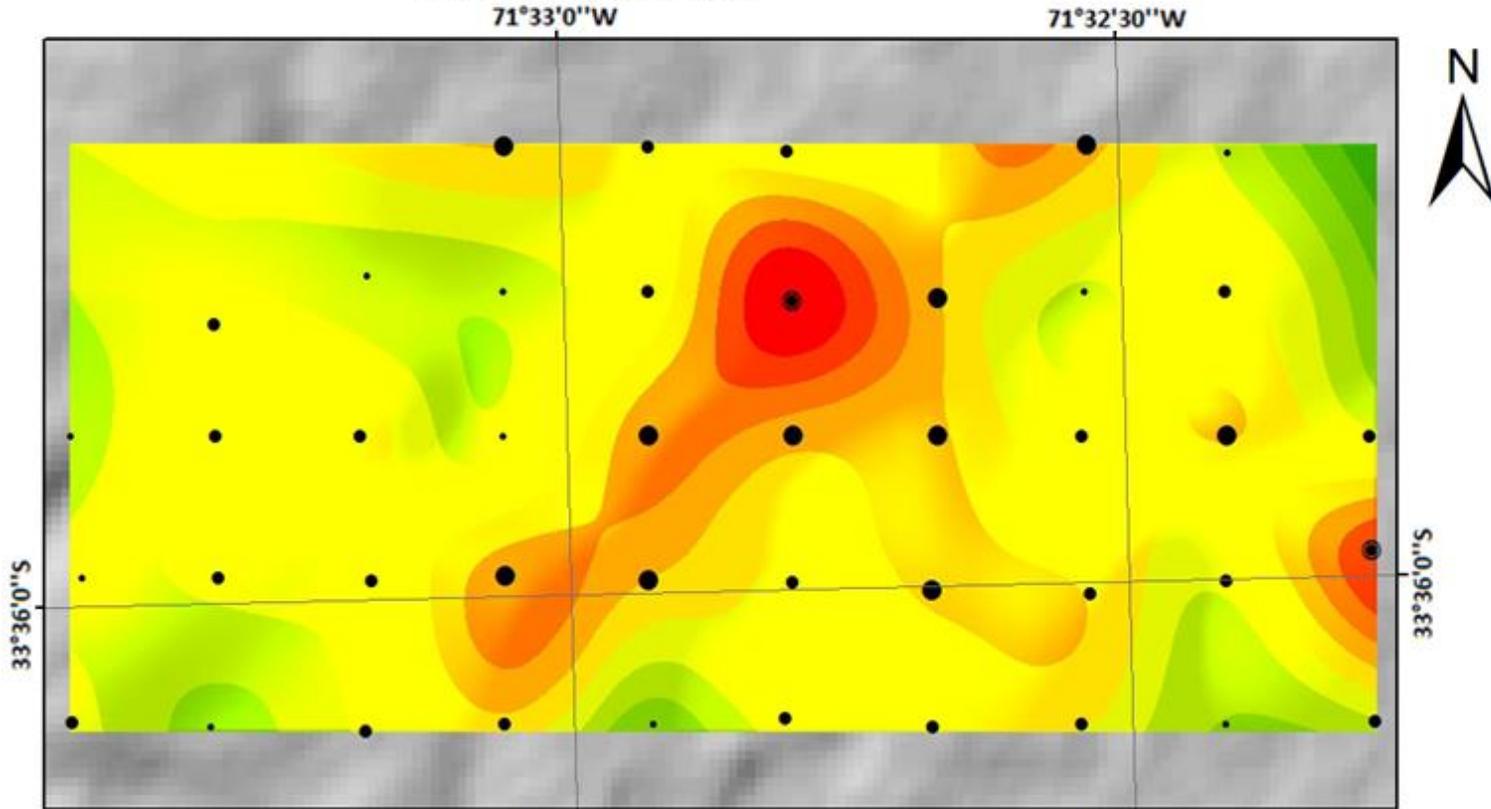


- 2,41-2,78
- 1,71-2,41
- 1,23-1,71

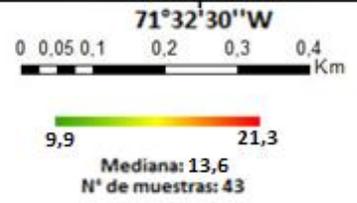


1,23 2,78  
Mediana: 2,05  
N° de muestras: 43

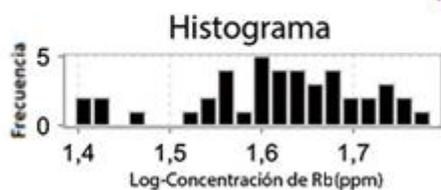
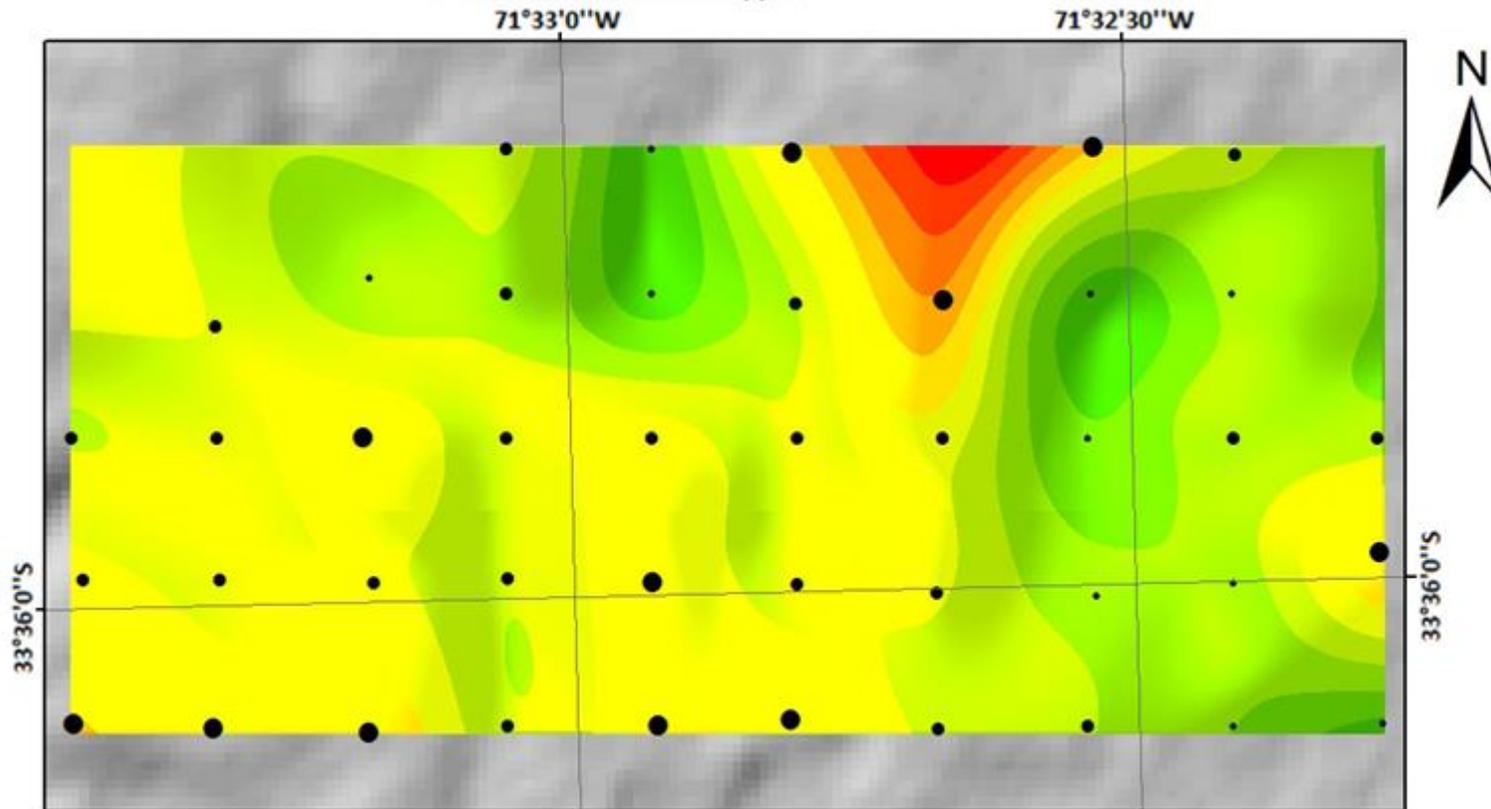
Geoquímica de suelos  
Concentración de Litio (ppm)



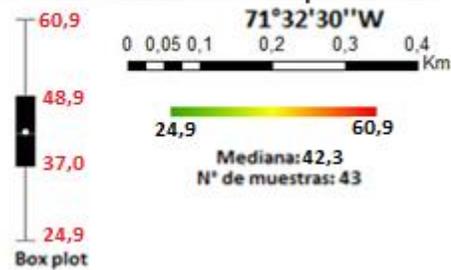
- 19,6-21,3
- 15,4-19,6
- 12,4-15,4
- 9,9-12,4



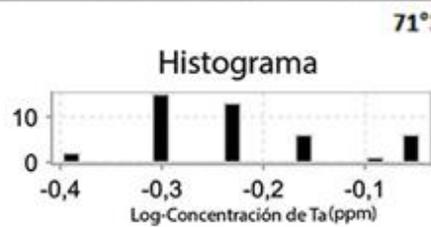
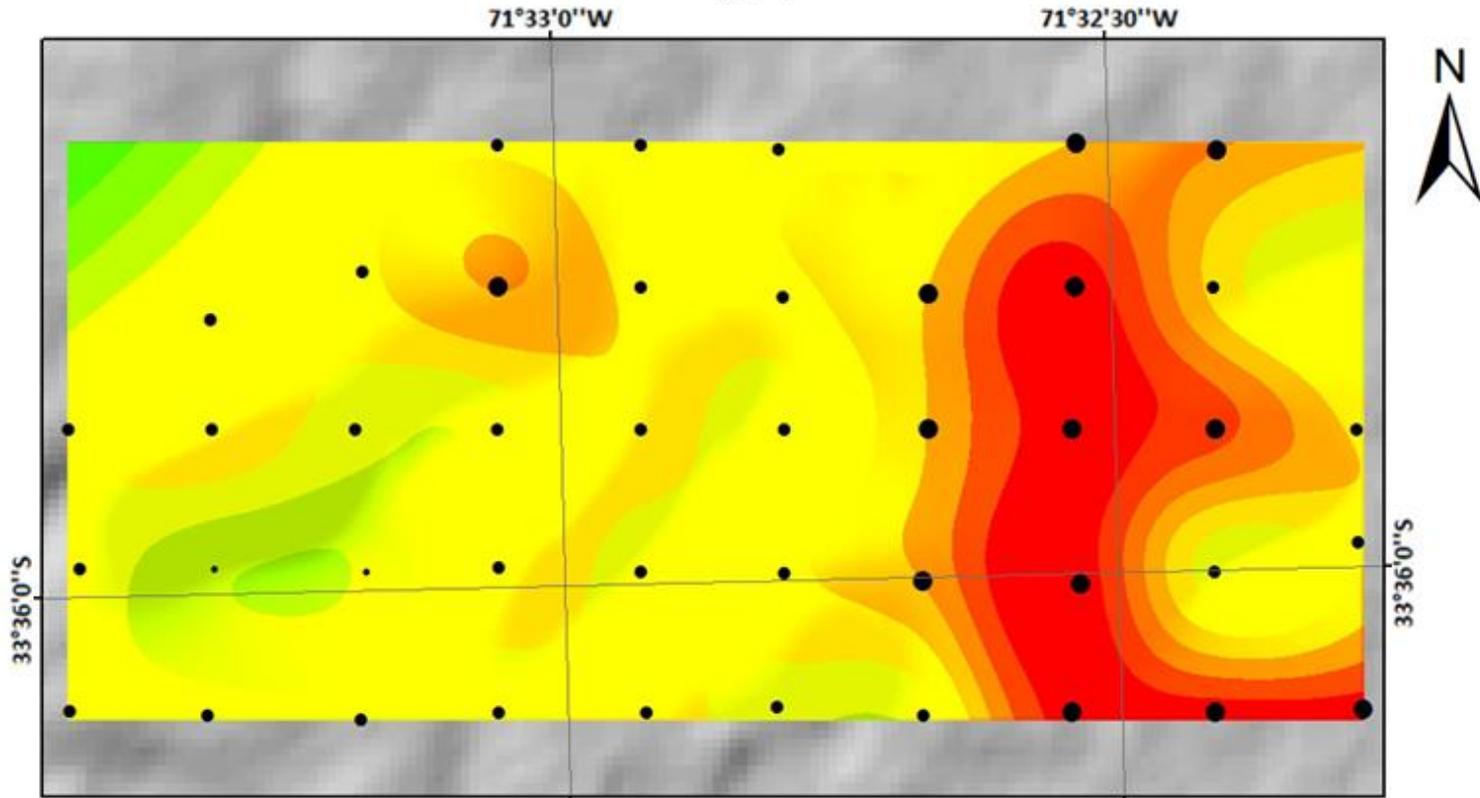
Geoquímica de suelos  
Concentración de Rubidio (ppm)



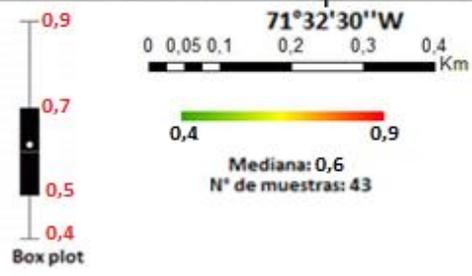
- 48,4-60,9
- 37-48,4
- 24,9-37



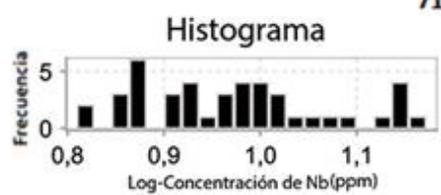
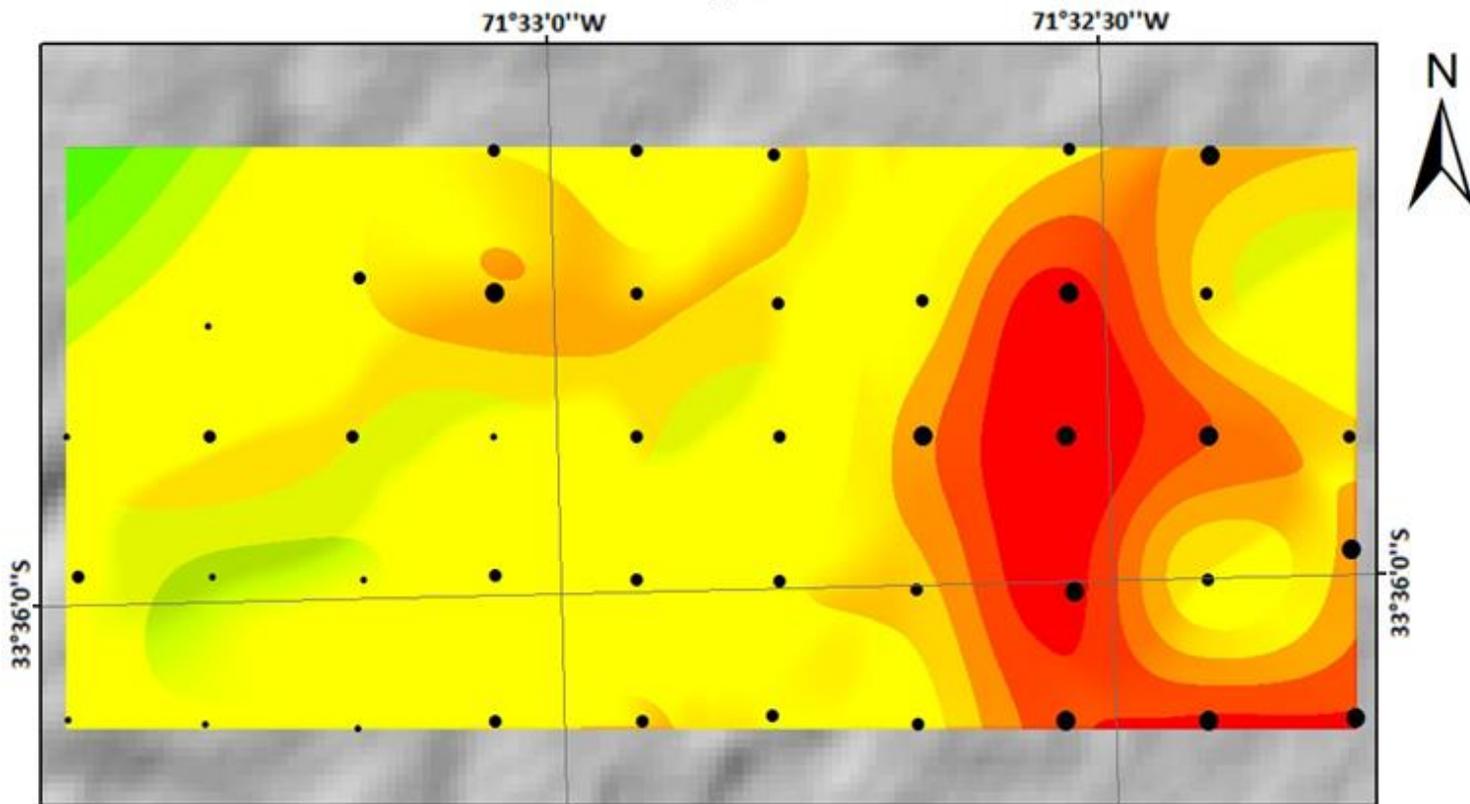
Geoquímica de suelos  
Concentración de Tantalio (ppm)



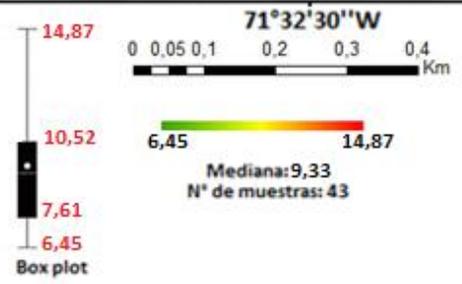
- 0,7-0,9
- 0,5-0,7
- 0,4-0,5



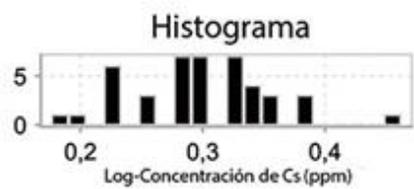
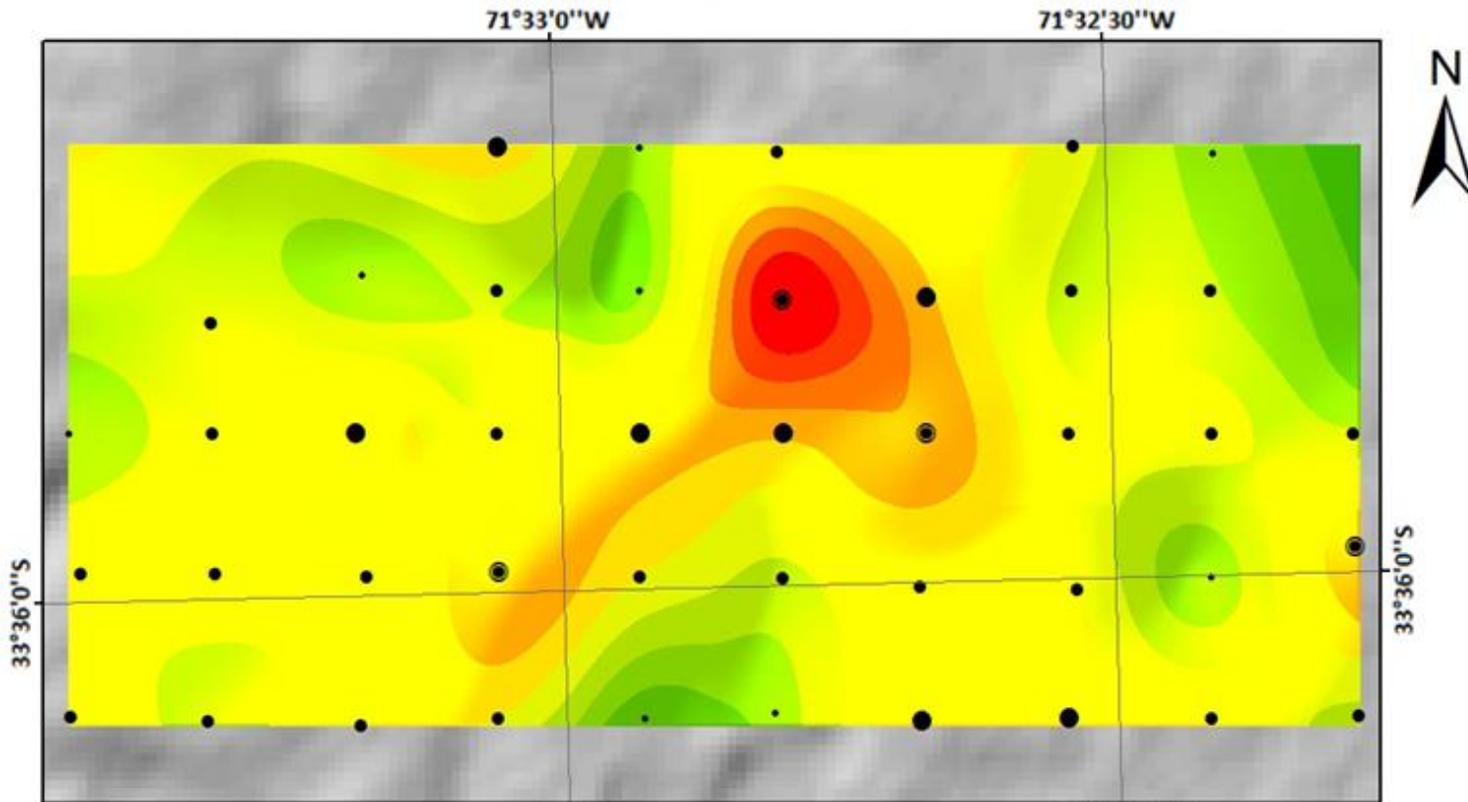
Geoquímica de suelos  
Concentración de Niobio (ppm)



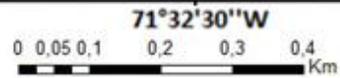
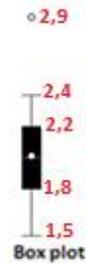
- 10,52-14,87
- 7,61-10,52
- 6,45-7,61



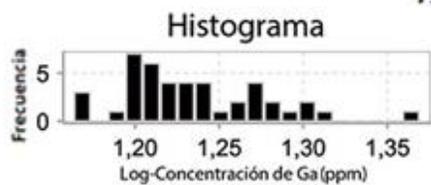
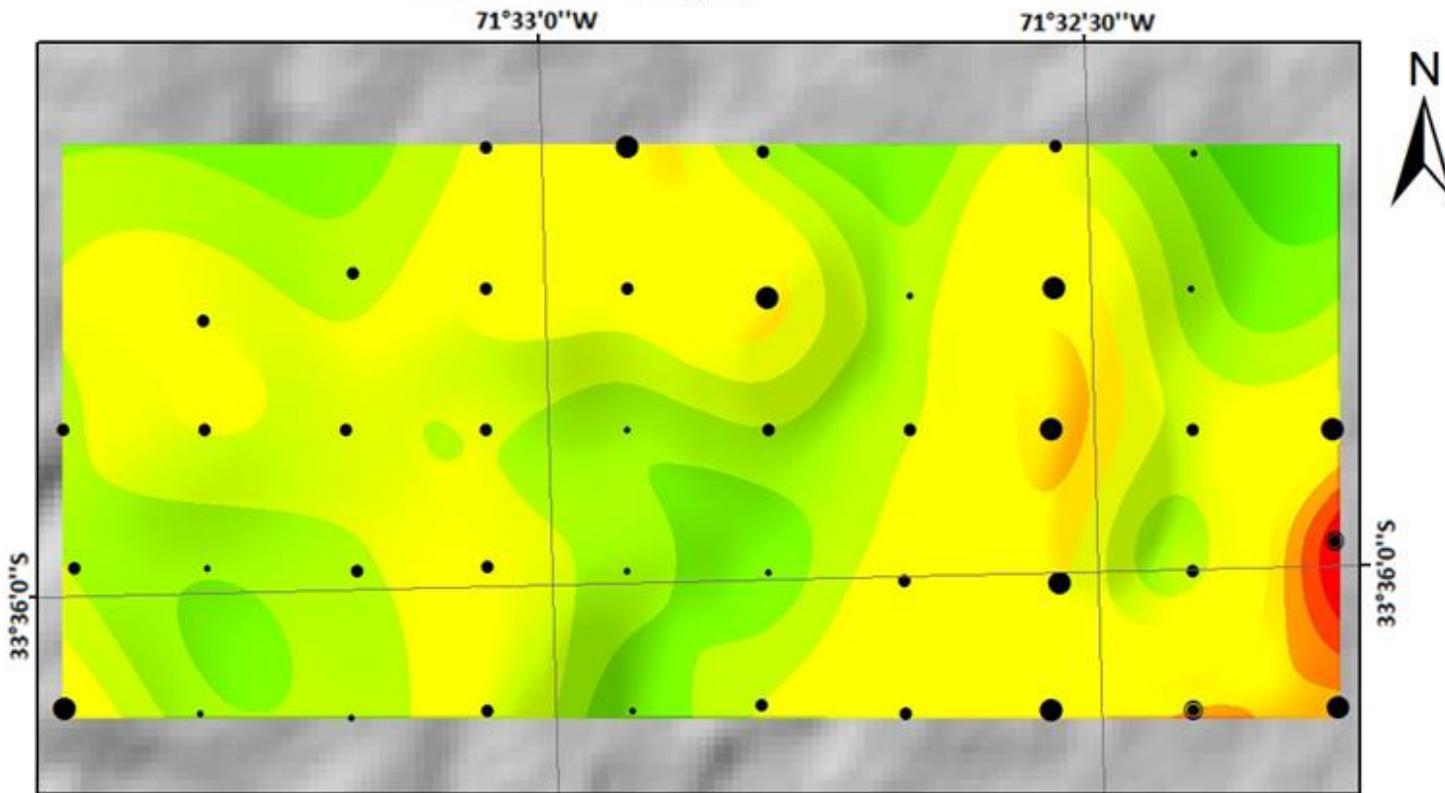
Geoquímica de suelos  
Concentración de Cesio (ppm)



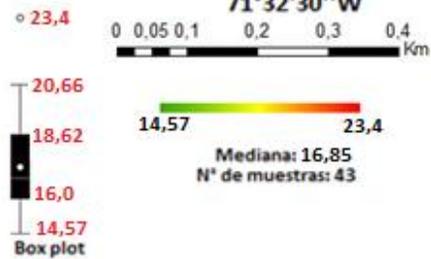
- 2,4-2,9
- 2,2-2,4
- 1,8-2,2
- 1,5-1,8



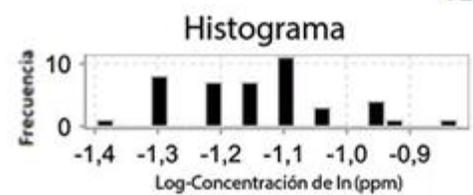
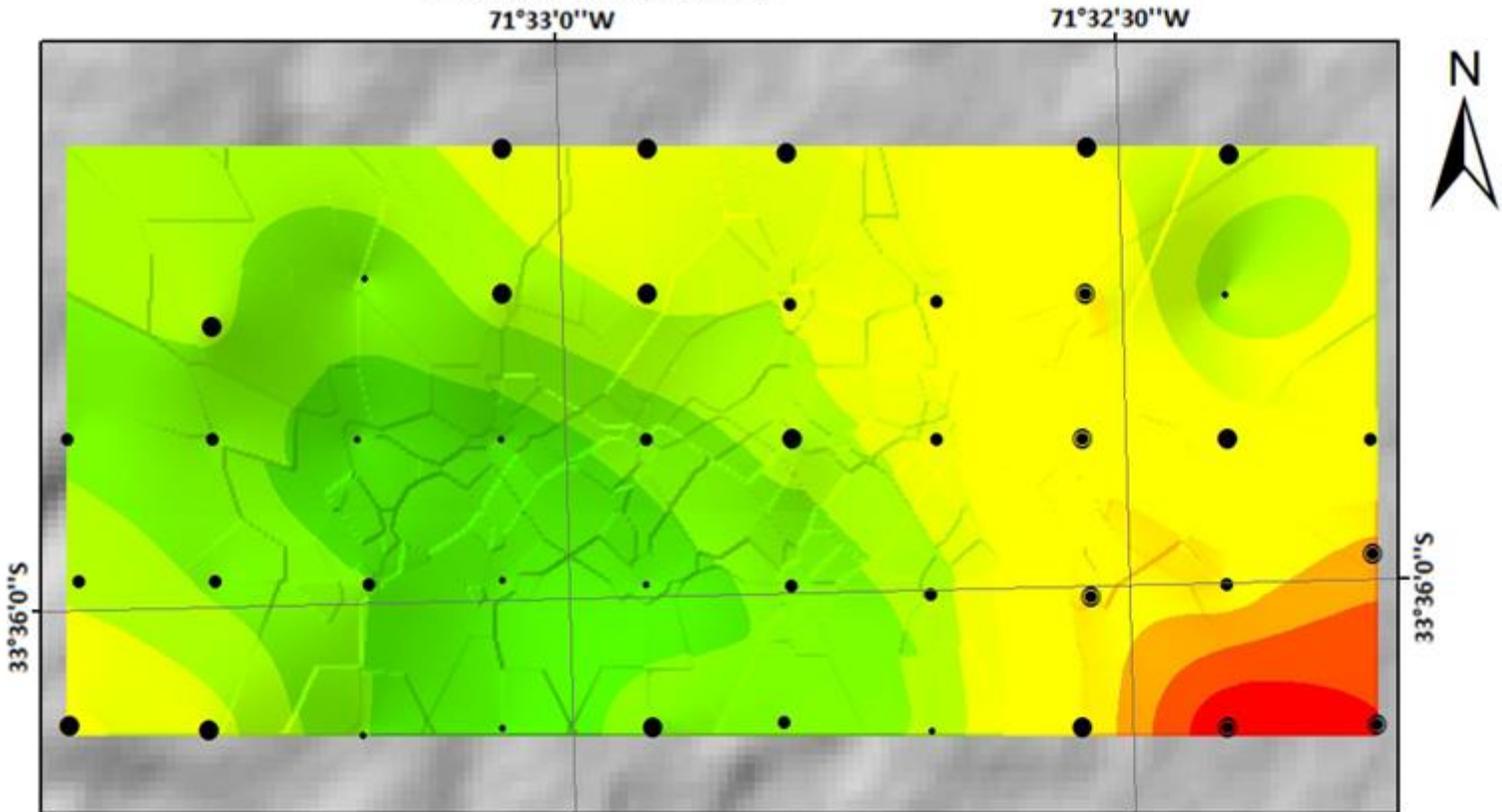
Geoquímica de suelos  
Concentración de Galio (ppm)



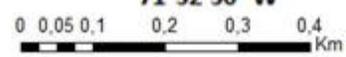
- 20,66-23,4
- 18,62-20,66
- 16-18,62
- 14,57-16



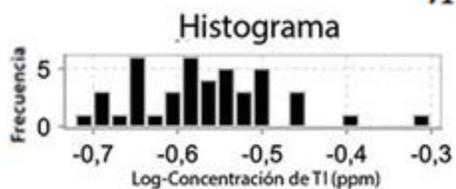
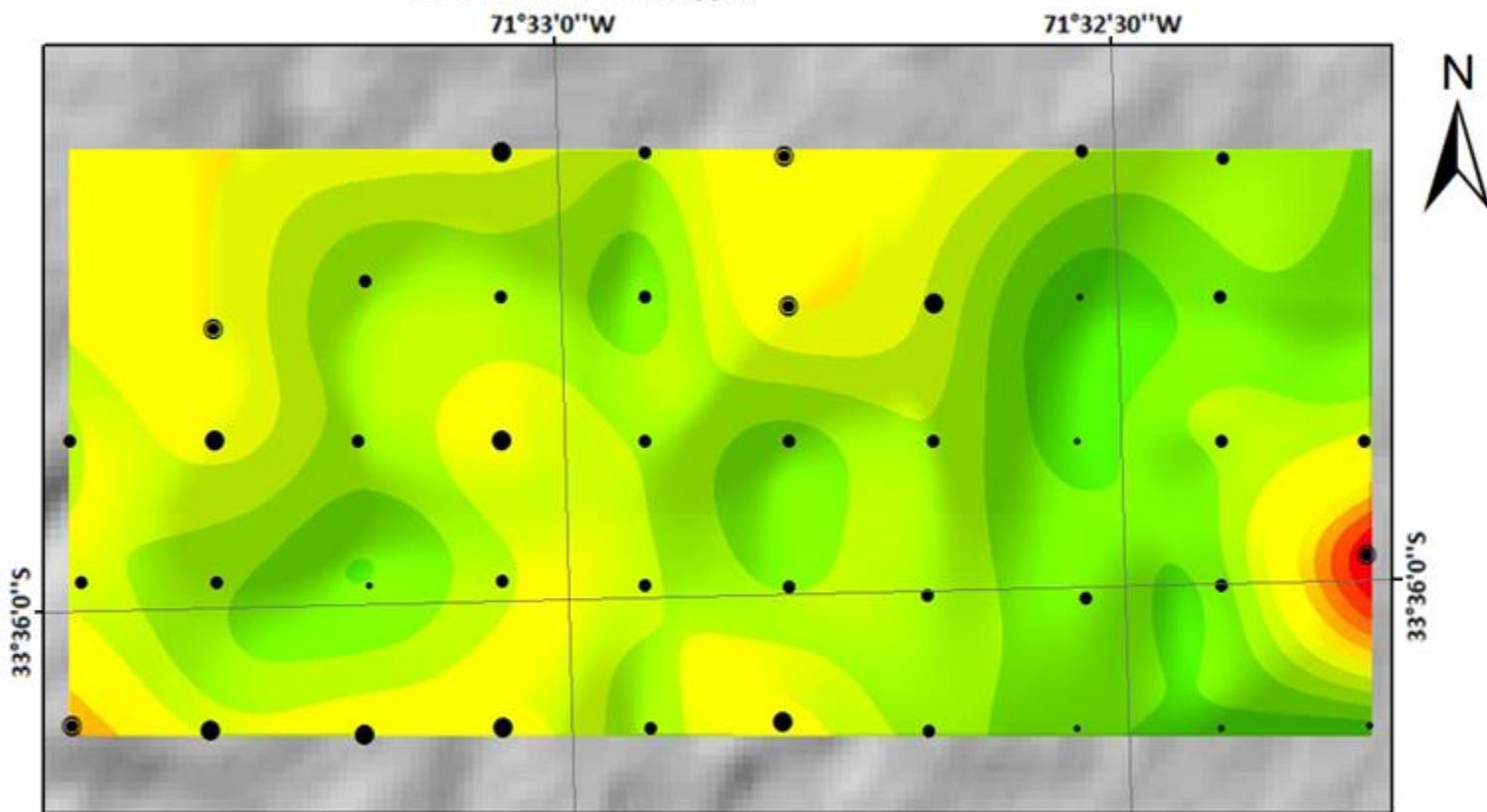
Geoquímica de suelos  
Concentración de Indio (ppm)



- 0,11-0,15
- 0,08-0,11
- 0,06-0,08
- 0,04-0,06



Geoquímica de suelos  
Concentración de Talio (ppm)



- 0,34-0,5
- 0,3-0,34
- 0,23-0,3
- 0,19-0,23

