



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA



**INFLUENCIA DEL CAMBIO DE USO DE SUELO EN LA
GEOQUÍMICA DE SUELOS EN EL PARQUE NACIONAL
NONGUÉN, REGIÓN DEL BIOBÍO, CHILE.**

Memoria para optar al título de Geóloga

Camila Francisca Navarrete Muñoz

Profesora Patrocinante: Dra. Fernanda Carolina Álvarez Amado

Profesional Guía: Dra. Pamela Ivonne Castillo Lagos

Profesoras Comisión: Dra. Javiera Paz Gerding González

MsC. Liubow Nikolaivna González Martínez

Concepción, 2023

ÍNDICE

	Pág.
RESUMEN	
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Presentación del Problema	1
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo general.....	3
1.2.2. Objetivos específicos.....	3
1.3. Hipótesis	3
1.4. Marco Teórico	3
1.4.1. Sistema edáfico y pedogénesis.....	3
1.4.2. Macro-micro nutrientes.....	4
1.5. Ubicación y Accesos	4
1.6. Trabajos anteriores	5
1.7. Agradecimientos	6
2. MARCO GEOGRÁFICO Y GEOLÓGICO	8
2.1. Clima	8
2.2. Vegetación	8
2.3. Uso de suelo e historia del Parque Nonguén	9
2.4. Geomorfología	10
2.4.1. Geomorfología regional.....	10
2.4.2. Geomorfología local.....	10
2.4.2.1. Cordones graníticos.....	11
2.5. Geología	12
2.5.1. Geología regional.....	12
2.5.1.1. Rocas metamórficas.....	12
2.5.1.2. Rocas intrusivas.....	12
2.5.1.3. Rocas sedimentarias.....	12
2.5.1.4. Depósitos recientes.....	13
2.5.2. Geología local.....	13
2.5.2.1. Basamento metamórfico.....	14
2.5.2.2. Batolito Costero del Sur.....	15
2.5.2.3. Depósitos coluviales.....	17
2.6. Hidrología	17
2.6.1. Cuenca de Nonguén.....	18
2.6.2. Usos de suelo.....	19
3. METODOLOGÍA	21
3.1. Muestreo y descripción de características de perfil de suelo (terreno) ..	21
3.2. Análisis geoquímico	21
3.2.1. Preparación de las muestras.....	21
3.2.2. Análisis de óxidos mayores.....	22
3.2.3. Análisis de elementos menores y traza.....	22
3.3. Base de datos composición intrusivo paleozoico	23
3.4. Procesamiento de los datos	24

3.4.1. Filtrado de elementos con baja respuesta analítica.....	24
3.4.2. Selección de elementos en estudio.....	24
3.4.3. Control de calidad.....	25
3.4.4. Búsqueda de valores anómalos o <i>outliers</i>	26
3.4.5. Cálculo de estadígrafos básicos.....	26
3.4.6. Cálculo de transferencia de masas.....	26
3.4.7. Matrices de correlación.....	27
4. RESULTADOS.....	28
4.1. Caracterización física de los suelos.....	28
4.2. Caracterización química de los suelos.....	36
4.2.1. Análisis estadísticos univariados.....	36
4.2.2. Diagramas multielemento.....	42
4.2.3. Coeficientes de transferencia de masas.....	45
4.2.3.1. Diagramas multielemento τ_{ij} por perfil.....	47
4.2.3.2. Perfiles comparativos de los τ_{ij} por elemento.....	52
4.2.3.3. Perfiles de suelo de enriquecimiento y empobrecimiento.....	57
4.2.3.4. Matrices de correlación.....	61
5. DISCUSIÓN.....	65
5.1. Evidencia de meteorización química.....	65
5.2. Contaminación por actividad antrópica.....	66
5.3. Influencia de la geología en la geoquímica del suelo del parque.....	67
5.4. Aspectos biogeoquímicos.....	68
5.5. Influencia del cambio de uso de suelo en la geoquímica del suelo del Parque Nacional Nonguén.....	69
6. CONCLUSIÓN.....	71
7. REFERENCIAS.....	72
ANEXOS.....	83

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
1. 1. Mapa de Ubicación.....	5
2. 1. Mapa geomorfológico regional.....	10
2. 2. Mapa geomorfológico cuenca Nonguén.....	11
2. 3. Mapa geológico cuenca Nonguén.....	14
2. 4. Mapa red de drenaje y esteros principales cuenca de Nonguén.....	17
2. 5. Mapa sub-usos de suelo dentro del Parque Nacional Nonguén.....	20
4. 1. Mapa sitios de estudio.....	28
4. 2. Perfil de suelo sitio NOBN1.....	30
4. 3. Perfil de suelo sitio NOBN2.....	31
4. 4. Perfil de suelo sitio NOBN4.....	32
4. 5. Perfil de suelo sitio NOPL1.....	34
4. 6. Perfil de suelo sitio NOPL3.....	35
4. 7. Perfil de suelo sitio NOPL4.....	36
4. 8. <i>Box plots</i> por tipo de suelo.....	41

4.	9.	<i>Box plots</i> elementos mayores con concentraciones menores.....	42
4.	10.	Patrones geoquímicos perfiles y roca madre (RM).....	43
4.	11.	Patrones geoquímicos promedio BN, promedio PL y roca madre (RM).....	44
4.	12.	Patrones geoquímicos promedio bosque nativo (BN), promedio plantaciones forestales (PL) y roca madre (RM) en escala logarítmica	44
4.	13.	Patrones geoquímicos perfiles y roca madre (RM).....	45
4.	14.	Diagramas multielemento τ_{ij} para elementos mayoritarios por perfil.....	49
4.	15.	Diagramas multielemento τ_{ij} para elementos traza por perfil.....	50
4.	16.	Diagramas τ_{ij} v/s profundidad por elemento, para elementos mayoritarios.....	55
4.	17.	Diagramas τ_{ij} v/s profundidad por elemento, para elementos traza.....	57
4.	18.	Perfiles de enriquecimiento del Cu, Cr y V.....	58
4.	19.	Perfiles de empobrecimiento del CaO y Na ₂ O.....	59
4.	20.	Perfiles de empobrecimiento del SiO ₂ , Al ₂ O ₃ y Fe ₂ O ₃	60
4.	21.	Perfiles de empobrecimiento del K ₂ O, P ₂ O ₅ , MgO y MnO.....	61

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

			Pág.
3.	1.	Instrumentos utilizados para la preparación de la muestra.....	21

ÍNDICE DE TABLAS

			Pág.
2.	1.	Características lineales y superficiales principales de la cuenca de Nonguén	19
3.	1.	Lista constituyentes analizados.....	23
3.	2.	Lista final de elementos para trabajar (Luego de filtrados).....	24
3.	3.	Error analítico calculado para cada elemento.....	26
4.	1.	Lista de los 18 elementos seleccionados.....	36
4.	2.	Estadísticos principales del perfil NOBN1.....	37
4.	3.	Estadísticos principales del perfil NOBN2.....	37
4.	4.	Estadísticos principales del perfil NOBN4.....	38
4.	5.	Estadísticos principales del perfil NOPL1.....	38
4.	6.	Estadísticos principales del perfil NOPL3.....	39
4.	7.	Estadísticos principales del perfil NOPL4.....	39
4.	8.	Concentraciones elementos.....	40
4.	9.	Resultados cálculo τ_{ij}	47
4.	10.	Resumen datos τ_{ij} general para cada perfil bajo bosque nativo.....	51
4.	11.	Resumen datos τ_{ij} general para cada perfil bajo plantación.....	55
4.	12.	Matriz de correlación constituyentes suelos bajo bosque nativo y profundidad (Prof.).....	62
4.	13.	Matriz de correlación constituyentes suelos bajo plantación y profundidad (Prof.).....	63
4.	14.	Resumen correlaciones importantes.....	64

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A METODOLOGÍA	83
1. Fichas descripción física in situ de los perfiles de suelo.....	84
2. Compilado composiciones Batolito costero del Sur	88
3. Tabla muestras estándar (STD).....	89
4. Tabla duplicados.....	89
ANEXO B RESULTADOS	90
1. Características físicas sitios bosque nativo.....	91
2. Características físicas sitios plantación forestal.....	92
3. Tabla resultados análisis químico sitios bosque nativo filtrada.....	93
4. Tabla resultados análisis químico sitios plantación forestal filtrados.....	94
5. Box plots por elemento individual BN1.....	95
6. Box plots por elemento individual BN2.....	96
7. Box plots por elemento individual BN4.....	97
8. Box plots por elemento individual PL1.....	98
9. Box plots por elemento individual PL3.....	99
10. Box plots por elemento individual PL4.....	100
11. Box plots por perfil en sitios bosque nativo.....	101
12. Box plots por perfil en sitios plantación forestal.....	102
13. Perfiles de empobrecimiento por elemento individual.....	103

RESUMEN

Biobío es una de las regiones más afectadas por el reemplazo de bosques nativos por especies forestales comerciales como el *Pinus radiata* en Chile. Esto provoca importantes consecuencias en los suelos, en distintos ámbitos e incluso contribuye con el cambio climático tanto a nivel local como global. Estudios de la influencia del cambio de uso de suelo de bosque nativo a plantaciones forestales, son relevantes para el bienestar de la población y para la reparación, o mitigación de las secuelas que esto puede dejar. En este contexto, el presente estudio se enfoca en evaluar el impacto que el cambio de uso de suelo puede tener en la geoquímica de elementos mayores y algunos metales, y en las tasas de meteorización química en los suelos de origen granítico en el Parque Nacional Nonguén. Este último constituye un área protegida que alberga gran diversidad biológica y además contiene el principal remanente de Bosque Caducifolio de Concepción, sin embargo, dentro de él permanecen plantaciones de pinos que dan cuenta de una antigua actividad forestal, lo que permite estudiar el impacto mencionado.

Para fines de este estudio se seleccionaron 3 sitios con bosque nativo (BN) y 3 con plantaciones forestales (PL), donde se excavaron calicatas de ~170 cm de profundidad en las cuales se realizó una descripción de los perfiles de suelo y un muestreo por horizonte genético. Las muestras de suelo se someten a análisis de ICP-OES para óxidos mayores (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , TiO_2 , P_2O_5) e ICP-MS para elementos traza (V, Cr, Co, Cu, Zn, Zr, Pb, As). Con los datos de composición se hace un análisis estadístico básico y se elaboran diagramas *box plot* para identificar *outliers* y comparar dispersión de datos, además se elaboran diagramas multielemento considerando también los datos de la roca parental (RM). Para poder estimar las ganancias y pérdidas reales de los elementos móviles con respecto de RM y evaluar los trazadores de meteorización química se hace el cálculo del coeficiente de transferencia de masa (τ_{ij}), que normaliza la concentración de un constituyente con la de un elemento inmóvil (en este caso TiO_2). Los resultados indican que los suelos bajo BN tienen mayor dispersión de los datos en casi todos los elementos, aunque para la concentración promedio, ambos usos de suelo exhiben patrones similares. Con los coeficientes de transferencia de masa se observan pérdidas en la mayoría de los elementos analizados, las que varían en magnitud tanto por sitio como por horizonte dentro de un mismo perfil. Por otra parte, hubo ganancias solo en los elementos Cu, Cr y V, con enriquecimiento promedio de 65%, 77% y 12%, respectivamente. Esto indica que, en los suelos estudiados, independiente del uso de suelo, existe una meteorización química avanzada, considerando y destacando que elementos como Ca y Na tienen pérdidas de casi el 100%, y nutrientes como el Mg, K y P registran pérdidas entre 50% a 80% en algunos de los horizontes. La ocurrencia de mineralogía secundaria como óxidos y arcillas vista en terreno, reflejada en varios de los resultados y además respaldada con datos de estudios previos en el parque, igualmente dan cuenta de la ocurrencia de procesos de meteorización. La pérdida de elementos se asocia a la hidrólisis, disolución y oxidación de los minerales formadores de roca, tales como plagioclasa (Ca, Na), feldespato potásico (Na, K), biotita y hornblenda (Mg) y de minerales accesorio como el apatito (P), entre otros. Las ganancias obtenidas se atribuyen a acción antrópica, la urbanización cercana y actividad industrial existente en la comuna pueden incorporar estos contaminantes (Cu, Cr y V) a la atmósfera, y posibilitan su llegada al suelo por deposición atmosférica seca o húmeda. Por su parte, el MnO, exhibe en su diagrama τ_{ij} v/s profundidad, un perfil considerado biogénico, que evidencia acumulación en superficie y aumento de empobrecimiento en profundidad, esto se asocia al ciclo biogénico de este micronutriente a través de la vegetación. Además, la variación en la movilidad del P (macronutriente esencial), y la aparente mayor acumulación de los constituyentes en superficie en PL, y el mayor empobrecimiento en profundidad (mayor que en BN), permiten incluir la calidad del *litter* desarrollado bajo las plantaciones como un factor que la afecta, ya que su descomposición más lenta puede dificultar el retorno de nutrientes al suelo. Todo lo anterior, faculta a concluir que el cambio de uso de suelo es capaz de modificar las propiedades físicas del suelo, interviene en su grado de meteorización química e influencia su geoquímica en el parque.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Presentación del Problema

El cambio de uso de suelo (LUC, por su sigla en inglés “*Land Use Change*”) corresponde a las diferentes formas en que se emplea un terreno y su cubierta vegetal (Semarnat, 2010 en López *et al.*, 2015). Dependiendo de la escala en la que este se realice puede tener consecuencias biofísicas o biogeoquímicas de diferentes magnitudes (Ramankutty & Foley, 1999). El LUC es considerado la primera causa de alteración del suelo y se ha convertido en un importante forzante del cambio climático regional y global (Houghton *et al.*, 1999; Chase *et al.*, 2000; Claussen *et al.*, 2001). Además, el cambio de uso de suelo incrementa la vulnerabilidad de ecosistemas y personas frente a desastres naturales (Lambin *et al.*, 2001), dado que genera la pérdida de biodiversidad (Foley *et al.* 2005) y puede alterar los ciclos globales del agua y nutrientes (Vitousek *et al.*, 1997). Es bien sabido entonces, y ha sido documentado por diversos autores (e.g., Correa-Araneda & Salazar, 2014; Chase *et al.*, 2000; Claussen *et al.*, 2001; Crovo *et al.*, 2021; Huber *et al.*, 2010; Vitousek *et al.*, 1997) que el cambio de uso de suelo tiene repercusiones sobre distintos medios y las consecuencias pueden ser significativas.

Los principales usos de suelo que alteran el estado natural de la cobertura de suelo pueden corresponder a la expansión de áreas urbanizadas, actividades de agricultura, industrialización, reforestación con especies exóticas, entre otros.

En Chile central y Centro-sur estas transformaciones se han asociado, inicialmente, a la expansión de la frontera agropecuaria y posteriormente al fuerte incentivo, por parte del Estado, a la forestación de especies exóticas, lo que causó un acelerado proceso de desarrollo forestal, que en gran medida explica la actual configuración del paisaje en la región (Correa-Araneda & Salazar, 2014). Según lo reportado por INFOR (2019), la última cifra disponible (diciembre, 2017) de superficie acumulada de plantaciones forestales son 2.289.525 hectáreas, de las cuales las plantaciones de *Pinus radiata* cubren un 56% y la mayor concentración se encuentra en la Región del Biobío (39% de la superficie), donde hay un predominio de esta especie.

Algunos autores (Aguayo *et al.*, 2009; Heilmayr *et al.*, 2016; Nahuelhual *et al.*, 2012) coinciden en que la expansión de las plantaciones es causa directa de la pérdida de bosques nativos en nuestro país, por ejemplo, en las regiones del Maule y Biobío, el 16,3% de los bosques nativos en pie en 1986 se habían convertido en plantaciones para el año 2011 (Heilmayr *et al.*, 2016).

Los resultados obtenidos por Nahuelhual *et al.* (2012), dejan en evidencia que en la Cordillera de la Costa del centro-sur de Chile, las plantaciones se han multiplicado por casi diez en el periodo comprendido entre 1975 y 2007 (tasa promedio de 6.4%/año), lo que tiene implicaciones importantes para la biodiversidad y el paisaje. De lo anterior, se revela entonces que el análisis de

estos cambios de vegetación nativa por plantaciones forestales es importante para tener registro de las consecuencias y buscar acciones de mitigación, recuperación y/o protección de ciertas áreas con alto valor ecosistémico.

Particularmente, el Parque Nacional Nonguén, comprende un área de 3.036,9 hectáreas (CONAF, sf) se encuentra en la parte occidental de la Cordillera de la Costa, sección en la que la litología presente corresponde principalmente a rocas paleozoicas del Batolito Costero del Sur, a las que mediante dataciones radiométricas se les ha determinado una edad que fluctúa entre Carbonífero y Pérmico (Creixell, 2001). Estas rocas son principalmente granodioritas y tonalitas, en conjunto con menores proporciones de dioritas y granitos (Hervé, 1977). Además, en su extremo sur aflora el Basamento Metamórfico (Paleozoico).

Este parque es una de las pocas unidades del SNASPE (Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado) insertas en un área urbana densamente poblada (CONAF, 2019), lo que lo hace susceptible a constantes modificaciones en sus inmediaciones. Alberga gran una variedad faunística entre los que se encuentran Pudú, Zorro Culpeo, Monito del monte y Ranita de Darwin, y dentro de su área cuenta con una alta cobertura de bosque nativo. En su límite oriental tiene un sector con especies exóticas comerciales y pequeños fragmentos que se introducen hacia el bosque nativo (CONAF, 2019), lo que lo convierte en un buen candidato para registrar de manera adecuada los efectos de la conversión de bosque nativo por plantaciones forestales, específicamente de *Pinus sp.*

Estudios como los de Crovo *et al.* (2021) y Correa-Araneda & Salazar (2014) han analizado algunas de las variaciones impulsadas por los cambios de uso de suelo en áreas del parque, pero estos se han limitado a objetivos específicos. Crovo *et al.* (2021) evalúan las concentraciones de macronutrientes (C, N, P) presentes en el suelo a distintas profundidades y cómo estas se ven afectadas por el uso de suelo presente; mientras que Correa-Araenda & Salazar (2014) estudian la fisicoquímica del agua del estero Nonguén y los cambios que esta muestra en relación a los tipos de vegetación predominantes. Sin embargo, aspectos como la influencia sobre la meteorización química y cambios a nivel geoquímico de estos suelos afectados por la conversión de bosques nativos, no han sido evaluados, tanto en el Parque Nacional Nonguén como en otras áreas de Chile.

Este proyecto de memoria propone realizar un análisis geoquímico mediante un estudio detallado de las características físicas y químicas del suelo bajo cada tipo de vegetación, que permitirá hacer un balance de masa para analizar las diferencias en ganancias y/o pérdidas de elementos bajo cada cobertura de suelo teniendo en consideración, además, las características del material parental; dado a que el área de estudio posee la misma litología del material parental en toda su extensión y, por lo tanto, representa una excelente oportunidad para comparar los contenidos de elementos mayores, menores o traza en ambos sistemas vegetacionales.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Determinar la influencia del cambio de uso de suelo en la geoquímica, así como también el grado de meteorización química en los suelos del Parque Nacional Nonguén, comparando aquellos desarrollados bajo bosque nativo con los suelos bajo plantaciones de pino.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar y comparar propiedades físicas y químicas por horizontes genéticos de suelos de bosques nativos y plantaciones de pinos.
- Determinar y contrastar los contenidos de elementos mayores, y metales en los perfiles de suelos desarrollados bajo bosques nativos y plantaciones de pino para evaluar variaciones geoquímicas, además de identificar los principales trazadores de posibles alteraciones.
- Evaluar si el cambio de uso de suelo genera un aumento en el grado de meteorización de suelos bajo las plantaciones de pino en el Parque Nacional Nonguén.

1.3. Hipótesis

Se postula en esta investigación que el cambio de uso de suelo, específicamente la transición de bosque nativo a plantaciones exóticas de pino constituye un factor predominante en el control de variaciones geoquímicas y grado de meteorización química en los suelos estudiados. De manera particular, se espera que las plantaciones modifiquen significativamente la composición química de estos y contribuyan al incremento de la meteorización. Todo esto comparando suelos de ambos usos bajo condiciones similares de topografía, tiempo de desarrollo y exposición antrópica, clima y material parental.

1.4. Marco teórico

1.4.1. Sistema edáfico y pedogénesis

El sistema edáfico o suelo, corresponde a la capa superficial, disgregada y de espesor variable que recubre la corteza terrestre (Aliaga, 2016; Jenny, 1994). Resulta de la alteración del sustrato litológico; se trata de un medio dinámico que cambia constantemente gracias a la interacción compleja entre la atmósfera, hidrósfera, corteza terrestre y biósfera (Jenny, 1994). Las propiedades de los suelos varían ampliamente, son anisótropos, lo que es fácilmente observable en el eje Z a medida que profundizamos en su perfil. Su composición diversa es controlada por una serie de factores, como la topografía, vegetación, tiempo, actividad antrópica, clima y material parental, siendo los últimos dos los que comúnmente predominan (Jenny, 1994).

Lo componen tres fases: una fase sólida (mineral y orgánica), una líquida y una fase gaseosa, y muestra las características que resultan del equilibrio tanto físico como químico entre estas (Jenny, 1994).

1.4.2. Macro- y micro-nutrientes

Los macro- y micro-nutrientes son aquellos elementos fundamentales para el crecimiento pleno y el logro de rendimientos óptimos en las plantas. Son nutrientes esenciales para su desarrollo y son requeridos en distintas dosis. Los macronutrientes son necesarios en mayores cantidades que los micronutrientes, que solo son necesarios en cantidades muy pequeñas de algunas partes por millón (Croda, 2023; Rogiers *et al.*, 2006).

Macronutrientes primarios son: carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N); fósforo (P); potasio (K), macronutrientes secundarios: azufre (S); calcio (Ca); magnesio (Mg), y micronutrientes: boro (B), cloro (Cl), cobalto (Co); cobre (Cu); hierro (Fe); manganeso (Mn); molibdeno (Mo) y zinc (Zn; Croda, 2023).

1.5. Ubicación y Accesos

El Parque Nacional Nonguén forma parte de la sección occidental de la Cordillera de la Costa, se ubica en la Provincia de Concepción, Región del Biobío, entre los 73° de latitud sur y los 36°52' de longitud oeste (Figura 1.1). Su área total incluye sectores de las comunas de Concepción, Chiguayante y Hualqui. Para acceder al parque se ingresa por el sector de Valle Nonguén perteneciente a la ciudad de Concepción, que es el único acceso habilitado para el público. Desde el sector Collao, se toma la vía a la derecha al camino a Valle Nonguén siguiendo la ruta pavimentada por unos 6 km aproximadamente, para luego continuar por un camino de ripio por unos 4.5 km hasta llegar a la portería del parque.

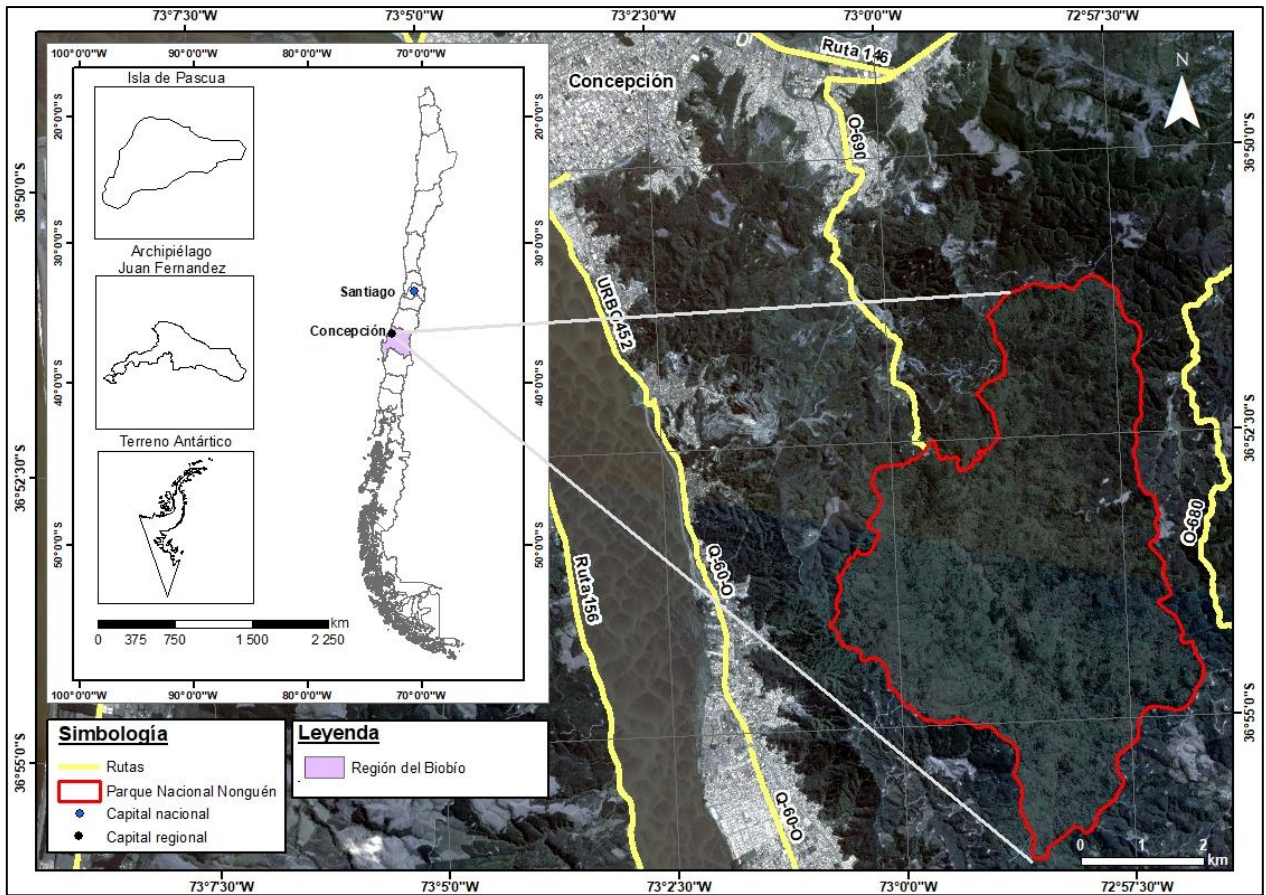


Figura 1.1: Mapa de ubicación

1.6. Trabajos Anteriores

El área de estudio comprende un pequeño porcentaje del territorio del Parque Nacional Nonguén, ubicado dentro del área de la cuenca homónima que es de suma importancia por ser el principal abastecimiento de agua para las comunas aledañas. En el parque existe una gran diversidad de especies de flora y fauna y es una de las pocas unidades del SNASPE (Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado) dentro de un territorio urbanizado, por lo tanto, es susceptible a constantes modificaciones en sus inmediaciones. Estas características, hacen que el parque sea blanco de estudio de numerosos autores en distintas ramas de la ciencia. En el siguiente listado se sintetizan algunos de ellos ligados a la geología.

AGUIRRE ET AL., 1972: Define el Basamento Metamórfico dentro del área de la cuenca. Realiza una caracterización litológica y las relaciones de estas rocas con otras unidades.

CREIXELL, 2001: En su memoria de título hace un estudio de la petrología y geotermobarometría de la Cordillera de la Costa en la región del Biobío. Reconoce y hace división de la unidad en tres

subunidades de acuerdo con sus características litológicas en Tonalitas Santa Juana, Granitoides Concepción y Granitoides Nahuelbuta.

CROVO ET AL., 2021: Evalúa y cuantifica la respuesta del cambio de uso desde bosques nativos a plantaciones exóticas, considerando aspectos como disponibilidad de C, N, P, estequiometría y características como la mineralogía del suelo. Realizan toma de datos en zonas de estudio en distintas localidades, donde una corresponde a Concepción y se sitúa específicamente dentro del Parque Nacional Nonguén.

EULA, 2002: Expone las principales características del Fundo Nonguén. Proporciona información detallada de la geología, geomorfología y usos de suelo dentro del área.

RAMIREZ, 2004: En su tesis describe la Cuenca Nonguén. Caracteriza tanto su geología y geomorfología, como coberturas y usos de suelo dentro del territorio.

CORREA-ARANEDA & SALAZAR, 2014: Realiza una caracterización fisicoquímica del agua del estero Nonguén, en la que evalúa las variaciones que esta presenta según cercanía a la urbanización o según los distintos usos de suelo, como áreas deforestadas o desarrollo de agricultura y ganadería.

1.7. Agradecimientos

Agradezco a la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) y Max Planck Institute for Biogeochemistry por el financiamiento de esta investigación a través del proyecto de cooperación internacional MPG 190022 “*Forest Carbon Associative Research: Quantifying the effect of forest use intensification on soil carbon stabilization processes*”, dirigido por el Dr. Felipe Aburto; agradezco igualmente por proporcionar recursos a la Vicerrectoría de Investigación y Desarrollo de la Universidad de Concepción, VRID InvestigadorAS - N°2022000571, bajo la dirección de la Dra. Fernanda Álvarez Amado.

Agradezco infinitamente a la Dra. Pamela Castillo Lagos, no tan solo por haberme aceptado e incluido en este proyecto y haberme dado la oportunidad de realizar mi memoria de título con ella, sino que también agradezco la hermosa persona que es y todo el apoyo moral, académico y emocional que me proporcionó durante los meses de trabajo, a la Dra. Fernanda Álvarez Amado por la propuesta del tema de memoria y por la ayuda brindada durante el proceso, a la Sra. Carolina Rojas por la contención y apoyo que me dio durante los años de carrera, y al equipo de

guardaparques de CONAF en el parque por la buena disposición y amabilidad cuando realizamos las campañas de terreno.

A todos(as) mis amigos(as) que han sido fundamentales para mi bienestar. En especial agradezco a Natalia Riquelme, por todos estos años de amistad y su apoyo tanto en este proceso como en los distintos pasajes de la vida, muchas veces a pesar de la distancia; a Karina López por su compañía y ayuda cuando me fue necesaria; a Simón Reyes, por su amistad y el tiempo que siempre estuvo dispuesto a darme; a Carolina Catalán por tener fe en mí y darme su apoyo de forma desinteresada en momentos en los que lo necesité; a Camila Avendaño por su infinito amor y sus ganas de verme crecer; a Daniel C., Francisca M., Jorge P., Iván A., Sebastián R., y tantos más que me extendieron su mano, un abrazo, una palabra de consuelo, un consejo, o un momento de sus vidas para escucharme o simplemente acompañarme en silencio, a todos ellos, muchísimas gracias.

Agradezco también a mi familia, especialmente a mis padres por todo su esfuerzo durante mis años de vida y de universidad para que nunca me faltara nada. A mi tía Yanette M. por recibirme en su hogar durante este tiempo y a mi tío Osvaldo M. y Lucía N. por siempre preocuparse por mí.

2. MARCO GEOGRÁFICO Y GEOLÓGICO

2.1. Clima

La región del Biobío marca una transición entre los climas templados y secos de la zona central de Chile y los climas templados lluviosos de las regiones inmediatamente al sur de esta (BCN, 2010). Según la clasificación de Köppen, el clima de la octava región corresponde a uno templado cálido con lluvias invernales, caracterizado por la existencia de una marcada estacionalidad (CONAF, 2019; EULA, 2002), con una estación lluviosa y otra seca.

El bosque del parque subsiste en un clima con precipitación anual de 1.294 mm, temperatura media anual de 13,1 °C (Luebert & Plissock, 2006 en CONAF, 2019) y humedad relativa con régimen bastante estable durante el año, con un valor medio anual de 87% (Di Castri & Hayek, 1976), que en la actualidad ha disminuido ($\approx 80\%$; Rubio *et al.*, 2015).

Según EULA (2002) el área del Fundo Nonguén se ubica en el distrito 8.2 en la clasificación agroclimática por distritos, correspondiente a un tipo de clima templado mesotermal inferior estenotérmico mediterráneo subhúmedo.

2.2. Vegetación

En el Parque Nacional Nonguén se protege el principal remanente de Bosque Caducifolio de Concepción, que a su vez constituye el principal remanente de bosque nativo de toda la Provincia (CONAF, 2019). Su vegetación nativa tiene alrededor de 2.100 hectáreas y en términos generales corresponde a un bosque de roble (*Nothofagus obliqua*) caracterizado por la presencia en mayor o menor grado de árboles propios del bosque esclerófilo y laurifolio o valdiviano. El bosque se caracteriza por roble, en coexistencia con especies arbóreas esclerófilas como *Cryptocarya alba* (peumo), *Persea lingue* (lingue), *Lithrea caustica* (litre), *Gevuina avellana* (avellano) y *Aextoxicon punctatum* (olivillo). Los bosques de quebrada son dominados por *Nothofagus dombeyi* (coihue), junto a especies más hidrófilas como *Laurelia sempervirens* (laurel), *Podocarpus saligna* (mañío de hojas largas) y *Amomyrtus luma* (luma). El estrato arbustivo lo componen *Chusquea quila* (quila), muy densa en algunos sectores, además de varias especies arbustivas y herbáceas que conforman el sotobosque (García, 2004).

La vegetación del parque además es de gran importancia ya que cuenta con varias especies en categoría de conservación, como *Berberis negeriana* (michay araucano; en peligro), *Citronella mucronata* (naranjillo; vulnerable) y *P. punctata* (pitao; en peligro; Echeverría *et al.*, 2021).

En relación con su estado de conservación en general, se tiene que las entre 1.500 y 2000 hectáreas de bosque nativo dentro del parque se encuentran en un estado de conservación bueno a regular, siendo así, el remanente de bosque caducifolio de mayor superficie mejor conservado de Concepción (EULA, 2002).

2.3. Uso de suelo e historia del Parque Nonguén

El Parque Nacional Nonguén forma parte del territorio de las comunas de Chiguayante, Hualqui y Concepción, y aunque es considerado el mayor fragmento de bosque nativo en la Provincia de Concepción, por el oeste se ve rodeado de plantaciones forestales de especies exóticas y urbanización con más de 800 mil habitantes. Es importante para la comunidad por su producción hídrica, y constituye un refugio para distintas especies, algunas en precario estado de conservación.

Hace más de 100 años, los árboles del parque ya incluían pequeñas plantaciones de pino y eucaliptus. En 1996 algunas fueron vendidas, se habilitaron caminos forestales para la extracción del producto, y luego, la parte intervenida fue reforestada con las mismas especies exóticas. Los monocultivos y la creación de caminos facilitaron la dispersión de semillas de especies no deseadas hacia otras zonas del parque, resultando en la distribución arbórea actual, con áreas de bosque mixto (nativo y exótico). Además, este ha sido afectado por diversos incendios a lo largo de su historia, incluso después de ser declarado Reserva Nacional, en 2009 y 2020 (Echeverría *et al.*, 2021) y en el año 2023.

Antiguamente el parque era conocido como “Fundo Nonguén” o “el Fiscal”, este surgió de la expropiación de 29 predios que fueron inscritos a nombre del fisco en 1911. En 1986 es transferido a SENDOS, que en 1990 se transforma en ESSBIO (Empresa de Servicios Sanitarios del Biobío S.A). A fines de los 90’s fue declarado Santuario de la Naturaleza, gracias a una campaña realizada por el Comité Nacional Pro-Defensa de la Flora y Fauna (CODEFF), por su importante biodiversidad en flora y fauna, y como medio de protección de la producción de agua potable para las ciudades de Penco y Lirquén.

En el año 2000, pasa de ESSBIO a la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO; CONAMA, 2002). En 2003, a partir de un seminario hecho por la CONAMA, la Comisión Pública se comprometió a ampliar la participación ciudadana con talleres de difusión y desarrollando la planificación participativa que derivó en el Plan de Manejo para Nonguén, y llevó al conceso de nombrarlo Reserva Nacional. En el año 2010, el Fundo Nonguén pasa a ser parte del Sistema Nacional de Áreas Protegidas del Estado (SNASPE) como Reserva Nacional Nonguén (RNN), con un área de aproximadamente 3.055 hectáreas, y en julio del 2021, la reserva es finalmente decretada como Parque Nacional Nonguén (Echeverría *et al.*, 2021).

2.4. Geomorfología

2.4.1. Geomorfología regional

Según la clasificación Borgel (1983) que divide Chile en 5 agrupaciones, la región del Biobío se encuentra en la denominada “Cuencas y llano fluvio-glacio-volcánico”. Esta a su vez se divide en cinco unidades fisiográficas principales: planicie marina y/o fluvio-marina, cordillera de la Costa, llano central fluvio-glacio-volcánico, precordillera y cordillera andina de retención crionival. El mismo autor divide el país en cinco macroformas de relieve principales, de oeste a este: planicies litorales; cordillera de la costa, depresión central, precordillera y cordillera de los Andes, las que se encuentran alineadas de forma paralela a lo largo de casi todo el territorio nacional (Figura 2.1).

El área de estudio en particular se ubica en el área correspondiente a Llanos de sedimentación fluvial y/o aluvial, que se encuentra inmersa en la Cordillera de la Costa (Figura 2.1).

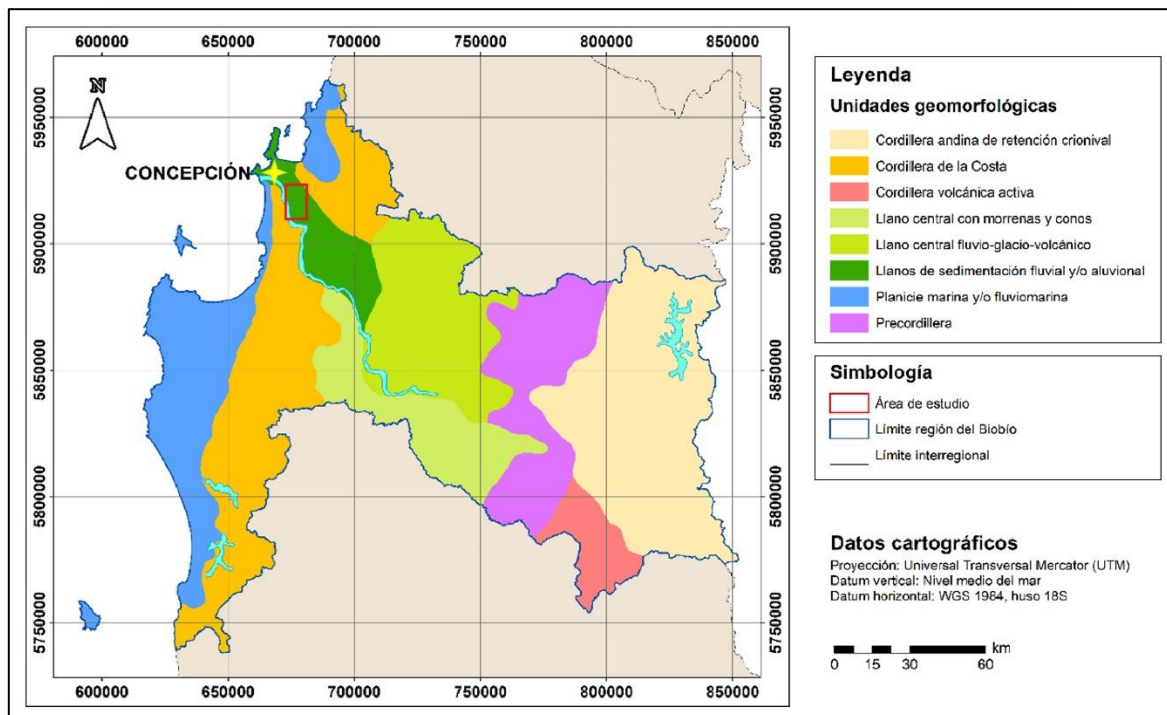


Figura 2.1: Mapa geomorfológico regional. Se destaca la ubicación del área de estudio en el recuadro rojo. Modificado de Borgel (1983).

2.4.2 Geomorfología local

La Cordillera de la Costa se compone principalmente de rocas graníticas y metamórficas (Hervé *et al.*, 1988), en las que los cordones graníticos con elevado grado de meteorización y factores morfológicos resultan en distintas formas de relieve. En la cuenca de Nonguén en particular corresponden a dos principalmente: relieves de erosión (cordones y plataforma) y relieves de

acumulación (valles locales y llanura aluvial; Figura 2.2). Los puntos específicos de interés se encuentran en las partes altas de la cuenca, correspondiente a cordones montañosos.

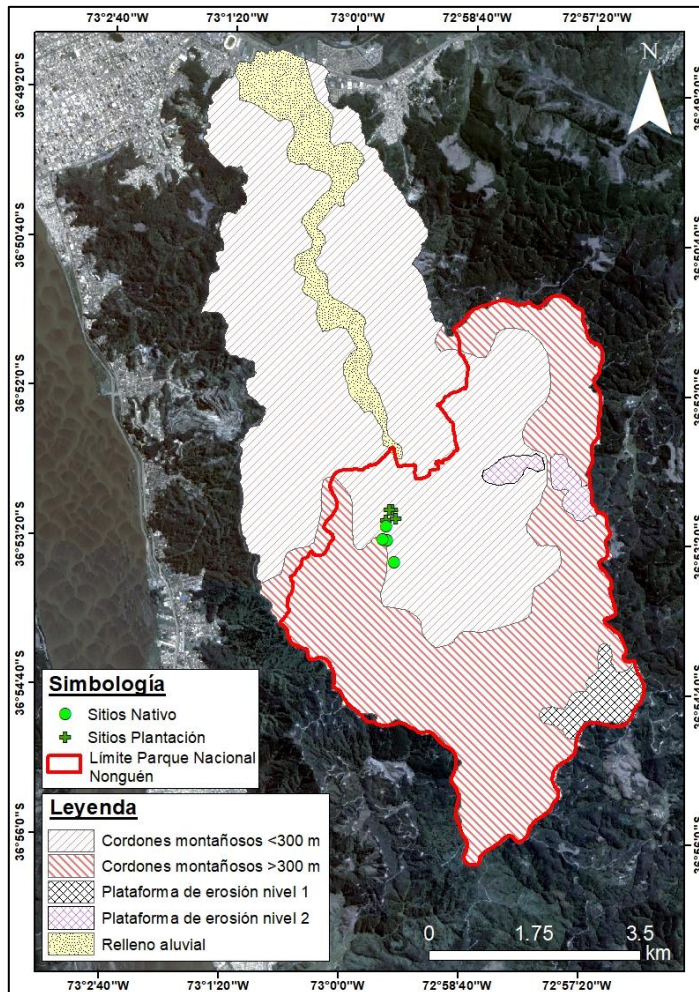


Figura 2.2: Mapa geomorfológico cuenca Nonguén. Se incluye la localización de los sitios de estudio del presente trabajo. Modificado de Ramírez (2004).

2.4.2.1 Cordones graníticos

Estos relieves ocupan mayor porcentaje de la cuenca, en específico, un 88% de su superficie total. Se presentan en dos niveles de altitud, >300 m s.n.m. y altitudes entre 200 - 250 m s.n.m. (EULA, 2002).

Los niveles superiores (mayores a 300 m s.n.m.) ocurren al sur y sureste de la cuenca, donde hay dominio de rocas metamórficas del basamento, los niveles inferiores (entre 200 y 250 m s.n.m.), por su parte, están en el sector norte y noroeste, en los cursos medios e inferiores de la cuenca, con rocas intrusivas del batolito (EULA, 2002; Ramírez, 2004).

Estos relieves tienen como base litológica rocas del Batolito Costero del Sur, que se caracteriza en el sector por presentar mayormente roca disgregada, lo que hace de estos cordones, muy frágiles y susceptibles a la erosión. Principalmente se produce erosión de laderas, deslizamientos o incluso derrumbes en las zonas con mayor pendiente (mayor al 20%) y sin la cobertura vegetal adecuada. Sin embargo, dado a que la cobertura boscosa permanente en los cordones graníticos de la cuenca supera el 75%, hay estabilidad de laderas, el bosque otorga protección y/o disminuye el impacto de factores desencadenantes de deslizamientos, como por ejemplo las precipitaciones (Ramírez, 2004).

2.5. Geología

2.5.1. Geología regional

En la región del Biobío se identifican tanto rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias, como también depósitos no consolidados de sedimentos recientes. Las rocas más antiguas corresponden a las del Basamento Metamórfico (Paleozoico).

2.5.1.1. Rocas Metamórficas

Las rocas metamórficas de la región corresponden a las pertenecientes al Basamento Metamórfico, un cinturón metamórfico pareado Paleozoico (Miyashiro, 1961; González Borino & Aguirre, 1970 en Hervé, 1988) cuyos afloramientos se distribuyen de forma continua a lo largo de la Cordillera de la Costa. Se subdivide en dos unidades, Serie Occidental y Serie Oriental (Aguirre *et al.*, 1972 en Muñoz, 2007), las que se encuentran en contacto por la falla Lanalhue (Glodny *et al.*, 2005).

2.5.1.2. Rocas Intrusivas

Gran parte de las rocas intrusivas de la región forman parte del Batolito Costero del Sur (Hervé *et al.*, 1987). No obstante, se identifican también cuerpos plutónicos más recientes (Hervé *et al.*, 1988). Las rocas del Batolito Costero del Sur (Paleozoico) se encuentran al este del Basamento Metamórfico (Creixell, 2001), afloran de manera continua en la Cordillera de la Costa del centro-sur de Chile, principalmente en la parte central de la cordillera de Nahuelbuta. El Plutón Hualpén (Triásico) aflora en las penínsulas de Hualpén y Tumbes. Intruye parte de la Serie Occidental del basamento, y a rocas del Batolito Costero del Sur (Creixell, 2001).

2.5.1.3. Rocas sedimentarias

En la región de estudio afloran distintas unidades estratificadas de origen marino y continental. Se reconocen de más antiguas a más jóvenes las siguientes formaciones: Formación Santa Juana de edad Triásico superior, Cárnico (Cariglino *et al.*, 2021) a Noriano medio (Pérez-Barría, 2004); Formación Quiriquinas, de edad al Maastrichtiense Superior (Salazar *et al.*, 2010); Formación Pilpilco, para la que Muñoz-Ramírez *et al.*, (2008, en Inostroza, 2018) sugieren edad máxima

Paleoceno; Formación Curanilahue de edad Eoceno inferior (Muñoz-Cristi, 1956; Pineda, 1983; Tavera, 1942); Formación Cosmito a la que se le asigna edad Eoceno (Galli, 1967); Formación Cerro Alto del Eoceno (Frutos *et al.*, 1982); Formación Boca Lebu de edad Eoceno inferior (Tavera, 1942); Formación Trihueco de edad Eoceno inferior (Arcos & Elgueta, 1993 en Geología de Campo II, 2019); Formación Millongue de edad Eoceno medio y superior (Inostroza, 2018); Formación Ranquil con edad Mioceno inferior (Aquitaniense-Burdigaliano; Nielsen & Glodny, 2009); Estratos Molinos del Sol con rango de edad Plioceno-Pleistoceno (Cartes, 2021); Formación Tubul a la que se le asigna edad Plioceno inferior (Rojas, 2000); Formación Andalién a la que se le estima una edad Oligoceno-Mioceno, (García, 2004; Frutos & Cisternas, 1994); y finalmente, Formación Huachipato con edad asignada Pleistoceno-Holoceno (Galli, 1967).

2.5.1.4. Depósitos recientes

Depósitos no consolidados de diferente naturaleza, entre ellos se encuentran depósitos litorales, fluviales, aluviales y coluviales, y depósitos de humedales y marismas. Todos estos se distribuyen por distintos sectores de la región de acuerdo con su ambiente de depositación, y en general corresponden a arenas con distintas características (distintos colores, tamaños de grano, madurez textural, etc). Además, están los suelos de rocas meteorizadas, restos orgánicos, limos, arcillas, entre otros.

2.5.2 Geología local

Según el trabajo realizado por EULA (2002), en la cuenca Nonguén se reconocen tres unidades geológicas principales: Basamento Metamórfico (compuesto por rocas de la Serie Oriental); intrusivos graníticos del Paleozoico (Granitoides Concepción); y sedimentos de valles recientes de edad Holoceno (Figura 2.3). En particular, en el área del Parque Nacional Nonguén se identifican rocas del Basamento Metamórfico y del Batolito Costero del Sur (Figura 2.3). Los puntos específicos de estudio de la presente investigación se ubican en el sector del Intrusivo Paleozoico (Figura 2.3); adicionalmente en las campañas de terreno de este estudio se identificaron, en las cercanías de los sitios de interés, algunos depósitos recientes de poca área total y principalmente de origen coluvial.

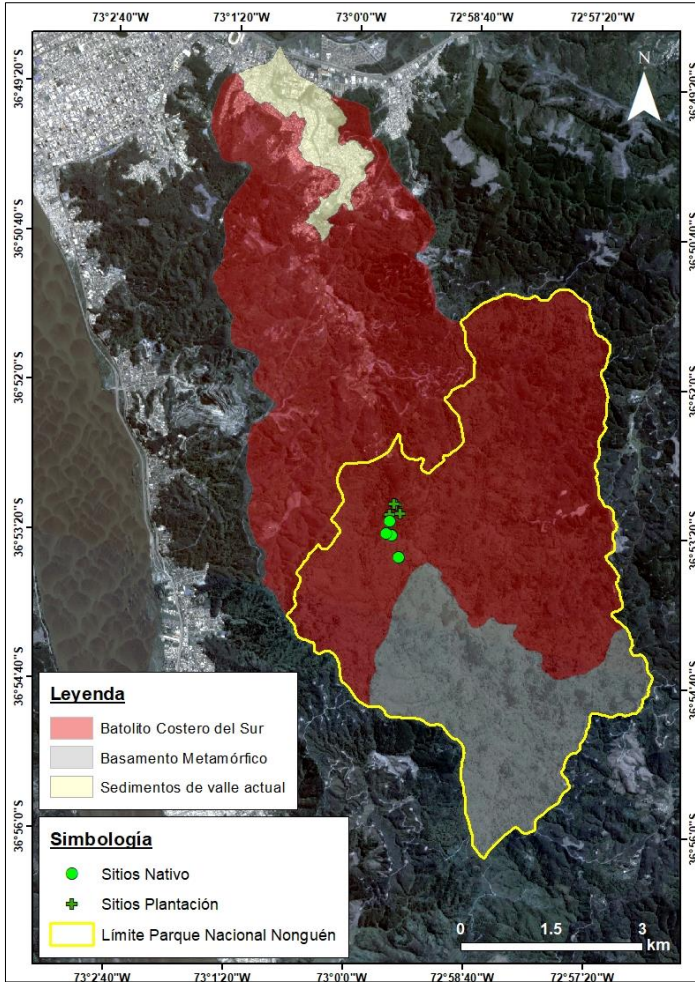


Figura 2.3: Mapa geológico cuenca Nonguén. Se incluye la localización de los sitios de estudio del presente trabajo. Modificado de Ferraris (1981) en EULA (2002).

2.5.2.1 Basamento Metamórfico

El basamento metamórfico, definido por Aguirre *et al.* (1972), se expone de manera continua a lo largo de la cordillera de la Costa, entre los 34°S y los 42°S. Se distribuye en dos franjas paralelas, conformando un cinturón metamórfico pareado que se subdivide en dos unidades principales: Serie Oriental y Serie Occidental (Aguirre *et al.*, 1972 en Muñoz, 2007).

Serie Oriental: Compuesta principalmente por metagrauvas, metapelitas y metapsamitas, en compañía de lentes y concentrados calcosilicatados, cuyo protolito corresponde a una acumulación de secuencias turbidíticas depositadas en un escenario de margen pasivo en el Devónico-Carbonífero (Hervé *et al.*, 2007). Ha sido afectada por dos eventos de metamorfismo: uno inicial de tipo Barroviano caracterizado por temperaturas y presiones intermedias, y un segundo de tipo Buchan, metamorfismo regional de contacto de baja presión y alta temperatura provocado por la intrusión del Batolito Costero del Sur. Este segundo evento desarrolla una aureola de contacto de unos 30 km de ancho aproximadamente, paralela al borde del intrusivo, en la que existe una marcada zonación en la distribución de las asociaciones de minerales metamórficos. Paralelas entre

sí y acercándose al intrusivo, se distinguen: zona de biotita, zona de andalucita, y zona de sillimanita (Hervé, 1977).

Serie Occidental: Se compone de metagrauvas fuertemente deformadas en intercalación con metabasitas, metaexhalitas (espesartina-cuarcita, cuarcita de estilpnomelano, sulfuros masivos, turmalina), micaesquistos y serpentinitas (Hervé *et al.*, 2007). Su protolito es descrito por Hervé (1977) como rocas principalmente derivadas de una secuencia de pelitas, semipelitas, cherts y rocas volcánicas básicas. El metamorfismo de esta serie va de medio a alto P/T y fue producido por la acreción basal iniciada en el Paleozoico (Hervé *et al.*, 2013). El de medio P/T se ve evidenciado por la ocurrencia de facies de esquistos verdes y micáceos, el de alto, por la presencia de facies de esquistos azules (Willner *et al.*, 2005; Glodny *et al.*, 2008).

2.5.2.2. Batolito Costero del Sur

Definido formalmente por Hervé *et al.* (1987). Esta unidad aflora de forma continua, entre los 33°S y los 38°20'S a lo largo de la Cordillera de la Costa (Glodny *et al.*, 2008), al este del Basamento Metamórfico y con orientación NNE-SSW (Creixell, 2001).

Las rocas del Batolito Costero instruyen a las rocas del Basamento Metamórfico e infrayacen en inconformidad a las rocas sedimentarias de la Formación Santa Juana (Triásico), además de las formaciones Quiriquina (Cretácico) y Curanilahue (Eoceno) (Hervé *et al.*, 1981; Quezada *et al.*, 1996).

La mineralogía principal de los granitoides es plagioclasa, feldespato alcalino, cuarzo, biotita y hornblenda, adicionalmente, también es característica común, la presencia de fenocristales de microclina (Hervé, 1977; Creixell, 2001). Dataciones radiométricas permiten hacer un estimado de la edad de la mayor parte de las rocas del Batolito Costero del Sur, que fluctúa entre Carbonífero y Pérmico (Creixell, 2001).

Para una mejor descripción del intrusivo en sus variaciones composicionales, Creixell (2001) propone las subunidades: Granitoides de Nahuelbuta (Granodioritas y tonalitas de biotita y hornblenda en la parte central de la Cordillera de Nahuelbuta), Tonalitas de Santa Juana (margen oriental del batolito, en las cercanías de Santa Juana) y Granitoides Concepción (granitoides de composición muy diferenciada, en las inmediaciones de Concepción).

Granitoides Nahuelbuta: Agrupada con las rocas distribuidas entre las latitudes de Curanilahue y Cañete, en la parte central y margen occidental de la Cordillera de Nahuelbuta. Se compone

principalmente de granodioritas y tonalitas, menores proporciones de cuarzodiorita, rocas ricas en cuarzo y granitos (Hervé *et al.*, 1976; Hervé, 1977; Creixell, 2001). Las granodioritas, en general de biotita y de biotita y anfíbola, se hacen localmente más abundantes hacia el margen occidental, en especial en el área de Curanilahue. Su litología tiene una zonación lateral en que tonalitas y granodioritas se encuentran en la parte central, y hacia los bordes las rocas de composiciones más diferenciadas, como algunos cuerpos pegmatíticos o granitos de biotita. En gran parte de su área corresponde a un cuerpo homogéneo con pocos xenolitos, pero hacia los márgenes es más heterogéneo, con gran cantidad de xenolitos, o gran presencia de muscovita o granate. Las granodioritas y tonalitas son intruidas por diques de leucogranitos de grano medio y tienen xenolitos de anfíbolita que aparecen en las inmediaciones del Parque Nacional Nahuelbuta.

Las granodioritas y tonalitas principalmente hipidiomórfica granular de grano grueso a medio (3 a 5 mm como promedio). Mayoritariamente corresponden a granodioritas y tonalitas de biotita, en menor medida, a granodioritas de biotita y anfíbola. Su mineralogía está compuesta principalmente por plagioclasa, microclina, cuarzo y minerales máficos como biotita y anfíbola cálcica, donde estas últimas pueden presentar como mineral accesorio circón y apatito. Puede haber también (como accesorio) turmalina, epidota, monacita, minerales opacos y esfeno. La plagioclasa frecuentemente presenta inclusiones de biotita y más esporádicamente de hornblenda, apatito, epidota, feldespato potásico y circón. En cuanto a los minerales de alteración, principalmente se reconocen sericita (mica blanca) y arcillas. La anfíbola tiene una leve alteración a biotita, clorita y epidota.

Por otro lado, los diques leucocráticos son en su totalidad monzogranitos leucocráticos de biotita, cuya composición mineralógica está dada por plagioclasa, microclina, biotita y cuarzo. Como minerales accesorios hay mica blanca, apatito, circón y epidota.

Finalmente, los xenolitos de anfíbolita se componen de plagioclasa (porfiroblastos y matriz), anfíbola (porfiroblastos y matriz), cantidades menores de biotita (matriz), cuarzo (matriz) y minerales opacos (matriz).

Tonalitas Santa Juana: En esta unidad se agrupan tonalitas de anfíbola cálcica y biotita que presentan foliación que aumenta su intensidad en su margen oriental (sector de San Rosendo) y xenolitos de anfíbola.

Las tonalitas tienen textura primaria hipidiomórfica granular de grano grueso y se constituyen principalmente de plagioclasa, biotita, anfíbola, cuarzo y microclina, con circón y apatito como minerales accesorios. Núcleos de las plagioclasas levemente alterados a sericita.

Granitoides Concepción: Esta unidad considera los granitoides que afloran principalmente en Concepción, dentro del área urbana. Corresponden principalmente a monzogranitos de biotita y en menor medida tonalitas de biotita y mica blanca, y rocas hipabisales de composición tonalítica.

La mineralogía esencial de los granitos está dada por plagioclasa, cuarzo, biotita, microclina y muscovita. Como minerales accesorios se encuentran circón y apatito. La microclina presenta localmente leve alteración a arcillas, la plagioclasa a saurita, sericita y arcillas. Las tonalitas presentan cuarzo, plagioclasa, biotita y mica blanca. La biotita tiene inclusiones de circón y apatito. La plagioclasa está alterada de forma incipiente a sericita, saurita y arcillas. Estas rocas tienen apatito, circón, titanita, turmalina y minerales opacos como accesorios. Por su parte, las rocas hipabisales, corresponden a microtonalitas. Se componen principalmente de plagioclasa, cuarzo, biotita, anfíbola y minerales opacos. Como accesorios presentan apatito y relictos de clinopiroxeno asociados a las anfíbolas. Poseen mineralogía secundaria bastante desarrollada, con plagioclasa parcial a muy alterada a sericita, arcillas, calcita y clorita.

Ramirez (2004), propone que la porción de intrusivo dentro de la cuenca Nonguén corresponde al definido por Creixel (2001), Granitoides Concepción.

2.5.2.3. Depósitos coluviales

Según lo observado en terreno, los depósitos coluviales en el área de estudio se encuentran principalmente en zonas de alta pendiente, en su mayoría a orillas de los senderos (cortes de camino). Son depósitos no consolidados que presentan una fracción de material disgregado de menor tamaño (tamaño arena y arcilla), en conjunto con clastos de mayor tamaño, que van de los 5 cm a los 10 cm, monomíticos y con clastos que van desde redondeados a subangulares. El material más fino corresponde a una mezcla de suelo y maicillo en el que se distingue aún su naturaleza proveniente del intrusivo alterado.

2.6. Hidrología

El Parque Nacional Nonguén se sitúa en la cabecera de la cuenca del estero homónimo (Cuenca Nonguén), que forma parte de la hoya hidrográfica del Río Biobío, una de las más extensas del país con un área de 24.029 km² (Figuroa *et al.*, 2020). La cuenca de Nonguén es, en particular, subcuenca de la cuenca del río Andalién, que tiene un área de 775 km² y en términos de superficie (Figura 2.4), es considerada la segunda cuenca costera a nivel regional (EULA, 2002; Jaque, 1996).

Específicamente, el Estero Nonguén, uno de los principales alimentadores del caudal del río Andalién (EULA, 2002; Echeverría, 2021), tiene una red de drenaje tipo dendrítico, con un trazado angular característico de terrenos graníticos. Nace de la confluencia de los esteros Compuy y

Manquimávida y sus tributarios principales son los esteros Rojas, Compuy, Manquimávida, San Francisco, Rodolmo y Los Lirios (EULA, 2002; Castillo, 2008; Figura 2.4).

2.6.1. Cuenca de Nonguén

La cuenca del río Nonguén se ubica entre los $36^{\circ}49'S$ y los $36^{\circ}54'S$ y los $72^{\circ}57'W$ y los $73^{\circ}01'W$ y tiene orientación general de sur a norte, con 17 km aproximados de longitud, altura máxima de 430 m s.n.m. y un área aproximada de 52.68 km² (EULA, 2002). Su régimen es de origen pluvial, en que los drenes de orden 1 y 2 según la clasificación propuesta por Sthraler (1992), son en su mayoría flujos intermitentes (Ramírez, 2004). En EULA (2002) realizan un estudio morfométrico de la cuenca y describen algunas de sus principales características (Tabla 2.1).

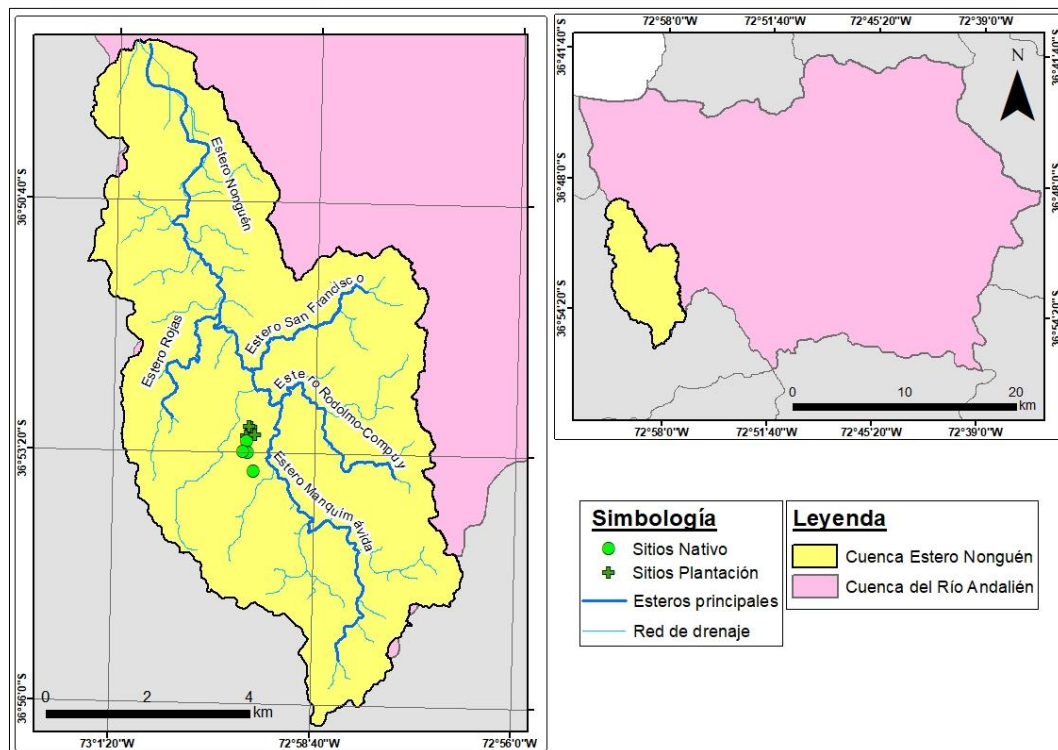


Figura 2.4: Mapa red de drenaje y esteros principales cuenca de Nonguén.

Tabla.2.1: Características lineales y superficiales principales de la cuenca de Nonguén. Modificado de EULA, 2002.

Características Lineales		Características Superficiales	
Número de orden	3	Área de la cuenca	52.68 km ²
Cauces de orden 1	75	Largo total de todos los cauces	9.5821 km
Cauces de orden 2	56	Densidad de drenaje	1.82 km/km ²
Cauces de orden 3	16	Número total de cauces	147
Longitud cauce principal	14,784 km	Frecuencia de cauces	2.79 1/km ²
Perímetro de la cuenca	38,772 km		

2.6.2. Usos de suelo

“Uso de suelo” es el término utilizado para describir el uso humano que se le da a la tierra. Representa las actividades económicas y culturales (por ejemplo, usos agrícolas, residenciales, industriales, mineros y recreativos) que se practican en un lugar determinado y que cambian dependiendo de este (EPA, 2018). A partir de la Figura 2.5 se pueden constatar las proporciones de los usos de suelo dentro del área protegida, los tres principales corresponden a bosque nativo, seguido de plantaciones forestales y, en tercer lugar, bosque mixto. Este último, considerado para el presente trabajo como el área que contiene los puntos de los perfiles de suelos desarrollados bajo plantación. Lo anterior se debe a que las plantaciones forestales en el parque no son manejadas productivamente. En terreno, se identificaron zonas en las que hay predominio de especies exóticas de varios metros a la redonda dentro del bosque mixto (“Manchones” solo de pinos, que a la distancia son rodeados por algunos ejemplares de nativo), en las que fueron dispuestos los sitios antes mencionados.

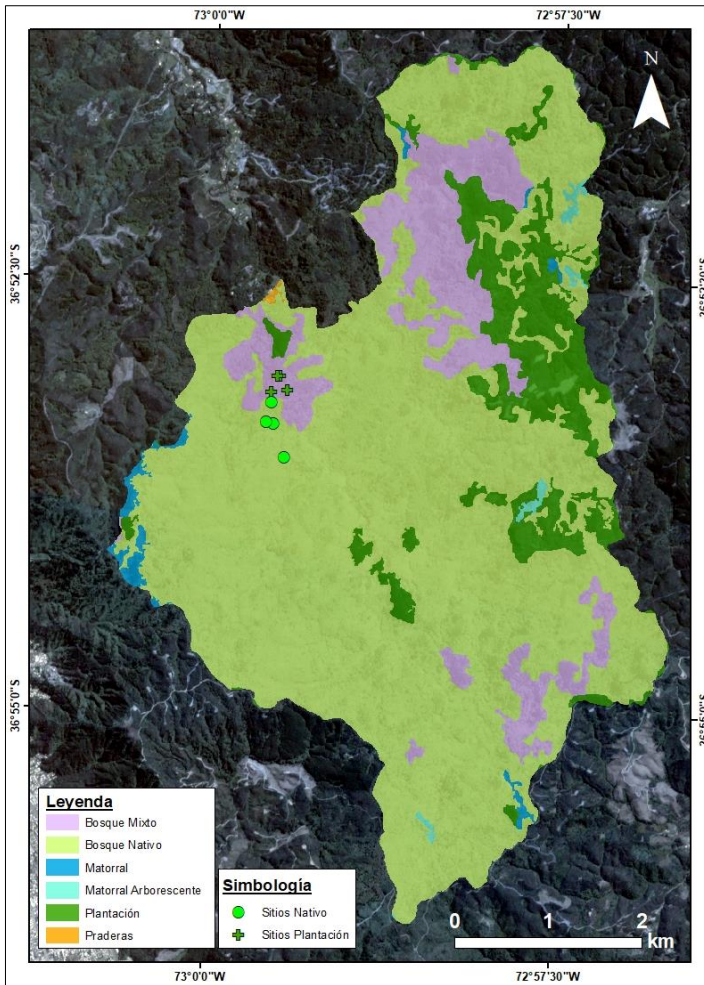


Figura 2.5: Mapa sub-usos de suelo dentro del Parque Nacional Nonguén. Se muestra la localización de los sitios de estudio. Modificado de CONAF (2015).

3. METODOLOGÍA

El trabajo realizado consta de cuatro etapas principales: muestreo y descripción *in situ* de perfil de suelo; análisis químico; recopilación bibliográfica de datos de composición del basamento intrusivo paleozoico; procesamiento de los datos.

3.1. Muestreo y descripción de características de perfil de suelo (terreno)

El muestreo de los perfiles de suelo se hace a través de la realización de calicatas en seis sitios dentro del área de estudio. La ubicación de cada sitio se selecciona estratégicamente considerando el tipo de vegetación predominante, condiciones topográficas similares y buena accesibilidad a estos, dejando igual número de calicatas, tres para suelos bajo bosques nativos y tres para suelos bajo plantaciones forestales.

Las calicatas se abren con pala y chuzo y tienen unos 1 m x 2 m de área aproximadamente, y una profundidad que varía levemente de perfil en perfil, pero que en general es cercana a 170 cm. Luego se ejecuta el muestreo y descripción de los perfiles según horizontes genéticos, procedimiento hecho en base a lo estipulado por Schoeneberger *et al.* (2012), que considera campos como la estructura, porosidad, cantidad de raíces, entre otros (Anexo A1).

3.2. Análisis geoquímico

Las muestras de suelos son enviadas para análisis químico al Laboratorio Actlabs (*Activation Laboratories Ltd.*) en Canadá, donde se analiza su composición química elemental con los métodos ICP-OES (*Fusion Inductively Coupled Plasma*) para óxidos mayores e ICP-MS (*Inductively coupled plasma mass spectrometry*) para determinación de elementos menores y traza.

3.2.1. Preparación de las muestras

Las muestras de suelo obtenidas en terreno fueron almacenadas a 2°C en las dependencias del laboratorio de suelos de la Facultad de Ciencias Forestales. La preparación de las muestras consiste en dos etapas, secado y tamizado, las que fueron realizadas en el Laboratorio de Sedimentología del Departamento de Ciencias de la Tierra.

Cada muestra se dispone en bandejas de manera individual para ser colocadas en un horno (Fotografía 3.1A) y secadas a 60 °C por 3 días, o hasta que se determine que se perdió la humedad. Luego del secado, pasan por un tamiz con malla de 2 mm (Fotografía 3.1B), con la finalidad de separar cada muestra en dos fracciones, una con partículas de tamaño mayor a 2 mm y otra con tamaño menor. De la fracción con menor granulometría (< 2 mm), se separa mediante cuarteo manual una alícuota de 40 g, que corresponde a la muestra enviada a análisis químico.



Fotografía 3.1: Instrumentos utilizados para la preparación de la muestra. A. Horno Laboratorio de Sedimentología Departamento de Ciencias de la Tierra; B. Tamiz malla N°10 de 2mm.

3.2.2. Análisis de óxidos mayores

El método utilizado para elementos mayores corresponde a FUS-ICP (*Fusion-Inductively Coupled Plasma*).

El análisis se realiza con una porción de la muestra de suelo que se disuelve en fundente de borato y posteriormente es diluida en ácido nítrico acuoso. Para cuantificar varios elementos en la solución resultante, se utiliza ICP-OES (*Inductively Coupled Plasma - Optical Emission Spectroscopy*; Actlabs, 2018), una técnica analítica cuyo principio utiliza el hecho de que los átomos pueden absorber energía para mover electrones desde el estado fundamental a un estado excitado. Ocupa como fuente de energía el calor de un plasma de argón que opera a 10.000 kelvin e identifica los elementos gracias a que cada átomo excitado libera una longitud de onda diferente a medida que pasa a un nivel más bajo. La cantidad de luz liberada para cada longitud de onda es proporcional a la cantidad de átomo o ion en transición.

Se identificaron un total de 17 óxidos y elementos con este método (Tabla 3.1), cuyas composiciones son entregadas en porcentaje (%) en peso.

3.2.3 Análisis de elementos menores y traza

El método para el análisis de elementos menores y traza corresponde a FUS-MS (*Inductively coupled plasma mass spectrometry*). En este análisis 1 g de la muestra se disuelve en un fundente de borato, luego es diluida en ácido nítrico acuoso, para finalmente cuantificar los elementos en la solución resultante con ICP-MS (Actlabs, 2018), técnica de análisis elemental similar al ICP-OES, solo que esta última mide la luz emitida por los elementos a medida que pasan a través del plasma

según el peso de los átomos. Este análisis entrega resultados de manera elemental y brinda límites de detección mucho más bajos que ICP-OES.

Se identifican un total de 38 elementos químicos con este método (Tabla 3.1), y sus composiciones son entregadas en partes por millón (ppm).

Tabla 3.1: Lista constituyentes analizados.

Elemento	Unidad	Método de análisis	Límite de detección (LMD)	Elemento	Unidad	Método de análisis	Límite de detección (LMD)
SiO ₂	%	ICP-OES	0.01	Cr	ppm	ICP-MS	20
Al ₂ O ₃	%	ICP-OES	0.01	Co	ppm	ICP-MS	1
Fe ₂ O ₃ (T)	%	ICP-OES	0.01	Ni	ppm	ICP-MS	20
MnO	%	ICP-OES	0.005	Tb	ppm	ICP-MS	0.1
MgO	%	ICP-OES	0.01	Dy	ppm	ICP-MS	0.1
CaO	%	ICP-OES	0.01	Ho	ppm	ICP-MS	0.1
Na ₂ O	%	ICP-OES	0.01	Er	ppm	ICP-MS	0.1
K ₂ O	%	ICP-OES	0.01	Tm	ppm	ICP-MS	0.05
TiO ₂	%	ICP-OES	0.001	Yb	ppm	ICP-MS	0.1
P ₂ O ₅	%	ICP-OES	0.01	Lu	ppm	ICP-MS	0.01
Sn	ppm	ICP-OES	1	Hf	ppm	ICP-MS	0.2
Sb	ppm	ICP-OES	0.5	Ta	ppm	ICP-MS	0.1
Cs	ppm	ICP-OES	0.5	W	ppm	ICP-MS	1
La	ppm	ICP-OES	0.1	Cu	ppm	ICP-MS	10
Ce	ppm	ICP-OES	0.1	Zn	ppm	ICP-MS	30
Pr	ppm	ICP-OES	0.05	Ga	ppm	ICP-MS	1
Nd	ppm	ICP-OES	0.1	Ge	ppm	ICP-MS	1
Sm	ppm	ICP-OES	0.1	As	ppm	ICP-MS	5
Eu	ppm	ICP-OES	0.05	Rb	ppm	ICP-MS	2
Gd	ppm	ICP-OES	0.1	Nb	ppm	ICP-MS	1
Sc	ppm	ICP-OES	1	Mo	ppm	ICP-MS	2
Be	ppm	ICP-OES	1	Ag	ppm	ICP-MS	0.5
V	ppm	ICP-OES	5	In	ppm	ICP-MS	0.2
Ba	ppm	ICP-OES	2	Tl	ppm	ICP-MS	0.1
Sr	ppm	ICP-OES	2	Pb	ppm	ICP-MS	5
Y	ppm	ICP-OES	1	Bi	ppm	ICP-MS	0.4
Zr	ppm	ICP-OES	2	Th	ppm	ICP-MS	0.1
				U	ppm	ICP-MS	0.1

3.3 Base de datos composición intrusivo paleozoico

Con el objetivo de comparar las composiciones de los suelos estudiados con los de la roca a partir de la cual se formaron (igual para todos los sitios), se debe contar con datos de la composición elemental del Batolito Costero del Sur.

Por el grado de meteorización de las rocas *in situ*, y la heterogeneidad del cuerpo intrusivo, se dificultó la obtención de una muestra de roca fresca y representativa del sector. Así, para poder

realizar la mencionada comparación, se lleva a cabo la recopilación bibliográfica de análisis químicos disponibles para el Batolito Costero en investigaciones realizadas por los autores Hervé *et al.* (1976), Creixell (2001) y Lucassen *et al.* (2004), con muestras de roca obtenidas desde diversos puntos de la región (Anexo A2). A partir de esa base de datos, se calcula un promedio para la composición del cuerpo intrusivo.

3.4. Procesamiento de los datos

Esta etapa se realiza por medio de la aplicación de técnicas estadísticas y cálculo del coeficiente de transferencia de masas con el *software* Excel.

3.4.1. Filtrado de elementos con baja respuesta analítica

Antes de someter los datos a cualquier análisis, se les hace un primer filtrado, eliminando los elementos que no tengan respuesta analítica (concentración menor al límite de detección (LMD)) en más de un 50% de las muestras.

3.4.2. Selección de elementos en estudio

Como el objetivo de la investigación es trabajar principalmente con los elementos mayores y nutrientes del suelo, los elementos seleccionados fueron Si, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K, Ti, P, V, Cr, Co, Cu, Zn, además se estudiaron los elementos Zr, As y Pb, el primero para evaluación como elemento inmóvil, y los otros para evaluación medioambiental dado la toxicidad de ambos elementos (Tabla 3.2).

Tabla 3.2: Lista final de elementos para trabajar (Luego de filtrados).

Elemento	Unidad	Motivo	Elemento	Unidad	Motivo	Elemento	Unidad	Motivo
SiO ₂	%	Elementos mayores	Na ₂ O	%	Elementos mayores; macronutriente	Co	ppm	Micronutriente
Al ₂ O ₃	%	Elementos mayores	K ₂ O	%	Elementos mayores; macronutriente	Cu	ppm	Micronutriente
Fe ₂ O ₃ (T)	%	Elementos mayores; micronutriente	TiO ₂	%	Elementos mayores; inmóvil	Zn	ppm	Micronutriente
MnO	%	Elementos mayores; micronutriente	P ₂ O ₅	%	Elementos mayores; macronutriente	Zr	ppm	Elemento inmóvil
MgO	%	Elementos mayores; macronutriente	V	ppm	Elemento traza	Pb	ppm	Metal (Tóxico)
CaO	%	Elementos mayores; macronutriente	Cr	ppm	Elemento traza	As	ppm	Metaloides (Tóxico)

3.4.3. Control de calidad

Si se trabaja con un set de datos obtenidos en un espacio geográfico se deben considerar sus distribuciones, tanto estadísticas como espaciales (Reimann *et al.*, 2008).

Para poder hacer uso seguro de los resultados analíticos, los resultados analíticos de los elementos seleccionados se someten a un control de calidad, utilizando muestras estándar (STD; Anexo A3) y duplicados de laboratorio (Anexo A4) para determinar exactitud y precisión de las mediciones. En este caso en particular no se cuenta con duplicados de terreno, por lo que el control se realiza solo considerando el cálculo de error analítico. Con la fórmula obtenida desde Stanley & Lawie, (2007):

$$\overline{cv}\% = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(2 \frac{(x_{1i} - x_{2i})^2}{(x_{1i} + x_{2i})^2} \right)} \times 100 \quad (4.1)$$

Donde x_{1i} y x_{2i} son una muestra y su duplicado y n el número de duplicados. En el caso de las muestras estándar (STD) se hizo uso de la misma fórmula, considerando el STD como duplicado.

Como resultado, se obtuvieron errores en su mayoría menores al 5% (Tabla 3.3). Para este estudio en particular se establece como límite un error del 10%, el que solo sobrepasan el Pb, As, con 15.95% y 11.44% respectivamente, y el CaO (en uno de los cálculos con STD), con un resultado de 10.13%, valor bastante cercano al límite propuesto de 10%, por lo que se decide utilizarlo de igual forma. Así, finalmente se comprueba la confianza de los datos y se puede proceder con las etapas siguientes.

Tabla 3.3: Error analítico calculado para cada elemento. En naranja se destacan los superiores al 10%.

Elemento	ERROR %		
	Duplicados Lab	STD	STD
SiO ₂	0.56	0.75	2.03
Al ₂ O ₃	1.57	0.81	1.13
Fe ₂ O ₃ (T)	1.10	1.19	1.75
MnO	0.34	2.80	3.39
MgO	0.67	0.33	6.98
CaO	0.00	0.34	10.14
Na ₂ O	1.82	1.63	2.81
K ₂ O	1.25	0.48	1.75
TiO ₂	1.27	1.80	1.89
P ₂ O ₅	6.43	4.22	9.07
V	0.71	2.90	-
Cr	7.20	2.85	-
Co	2.83	1.50	-
Cu	0.00	1.96	-
Zn	6.01	0.00	-
Zr	3.28	5.98	-
Pb	15.95	9.24	-
As	11.44	-	-

3.4.4. Búsqueda de valores anómalos o *outliers*

En el presente estudio, la identificación de *outliers* se realiza con dos criterios, uno gráfico, mediante diagramas *box plot* para cada elemento por cada perfil (BN1, BN2, BN4, PL1, PL3 y PL4; Anexo A5 a A10), y otro mediante el uso de los estadígrafos media y desviación estándar (DE), evaluando media (+/-) 3.5DE, para cada elemento por cada perfil de suelo. La búsqueda de estos valores anómalos no implica su eliminación de la base de datos, sino más bien su identificación para posterior evaluación/discusión de la razón de dicha anomalía.

3.4.5. Cálculo de estadígrafos básicos

La distribución estadística de los elementos seleccionado es calculada para las variables con un nivel de confianza aceptable, mediante la determinación de estadígrafos básicos, entre ellos: valores máximo y mínimo, mediana, media, desviación estándar, percentiles principales (25 y 75) y coeficiente de variación.

3.4.6. Cálculo de transferencia de masa

Una última etapa en el procesamiento de los datos para cumplir con los objetivos de este trabajo es el cálculo del coeficiente de transferencia de masas, con lo que se busca examinar las ganancias y/o pérdidas elementales del suelo durante su proceso de formación, dado a que la concentración

de un elemento en el suelo es una medida relativa, es decir esta puede aumentar aparentemente a causa de las mayores pérdidas de otros elementos. Por ejemplo, la concentración de Fe puede ser mayor en un suelo que en su material original, a pesar de que el proceso de transformación del material original a suelo haya implicado pérdida de ese elemento por lixiviación, esto se debe a que otros elementos solubles, como el K y el Na se han perdido más fácilmente o en mayor cantidad, este problema es entonces resuelto normalizando las concentraciones de los constituyentes de un suelo, con las concentraciones de elementos como el Zr o Ti, que son más bien inmóviles y tienden a concentrarse en los suelos (Yoo, 2017).

Consideramos el cálculo del coeficiente de transferencia de masa para cada uno de los constituyentes del suelo con la fórmula de Brimhall & Dietrich (1987):

$$\tau_{ij} = \frac{C_{jw}}{C_{jp}} * \frac{C_{ip}}{C_{iw}} - 1 \quad (4.2)$$

En donde C_{jw} corresponde a la concentración del constituyente j en el suelo (w); C_{jp} es la concentración del constituyente j en la roca parental (p); C_{ip} , concentración del elemento inmóvil i , en la roca parental; C_{iw} , concentración del elemento inmóvil en el suelo.

Con los τ_{ij} calculados se elaboran distintos tipos de diagramas tanto por elemento como por perfil y uso de suelo. Esto permite tener una mejor representación de los datos para identificar más fácilmente las diferencias principales entre componentes/perfiles/ usos de suelo.

3.4.7. Matrices de correlación

De forma adicional, se construyen dos matrices de correlación de Pearson una para NOBN y una para NOPL, considerando como variables en cada matriz las concentraciones de elementos ($n=14$) y la profundidad media de cada horizonte ($n=1$), para así comprender mejor las interdependencias y relaciones que existen entre las 15 variables consideradas.

4. RESULTADOS

Se hizo muestreo vertical por horizonte de suelo en cada uno de los seis sitios seleccionados como puntos de estudio y se realizó además descripción física de cada horizonte del perfil de suelo (Anexo A1 y B1) de acuerdo con lo especificado por Schoeneberger *et al.* (2012). Los nombres de los sitios de estudio bajo bosque nativo son NOBN1, NOBN2 y NOBN4 y los sitios bajo plantaciones de pino se denominan NOPL1, NOPL3 y NOPL4 (Figura 4.1).

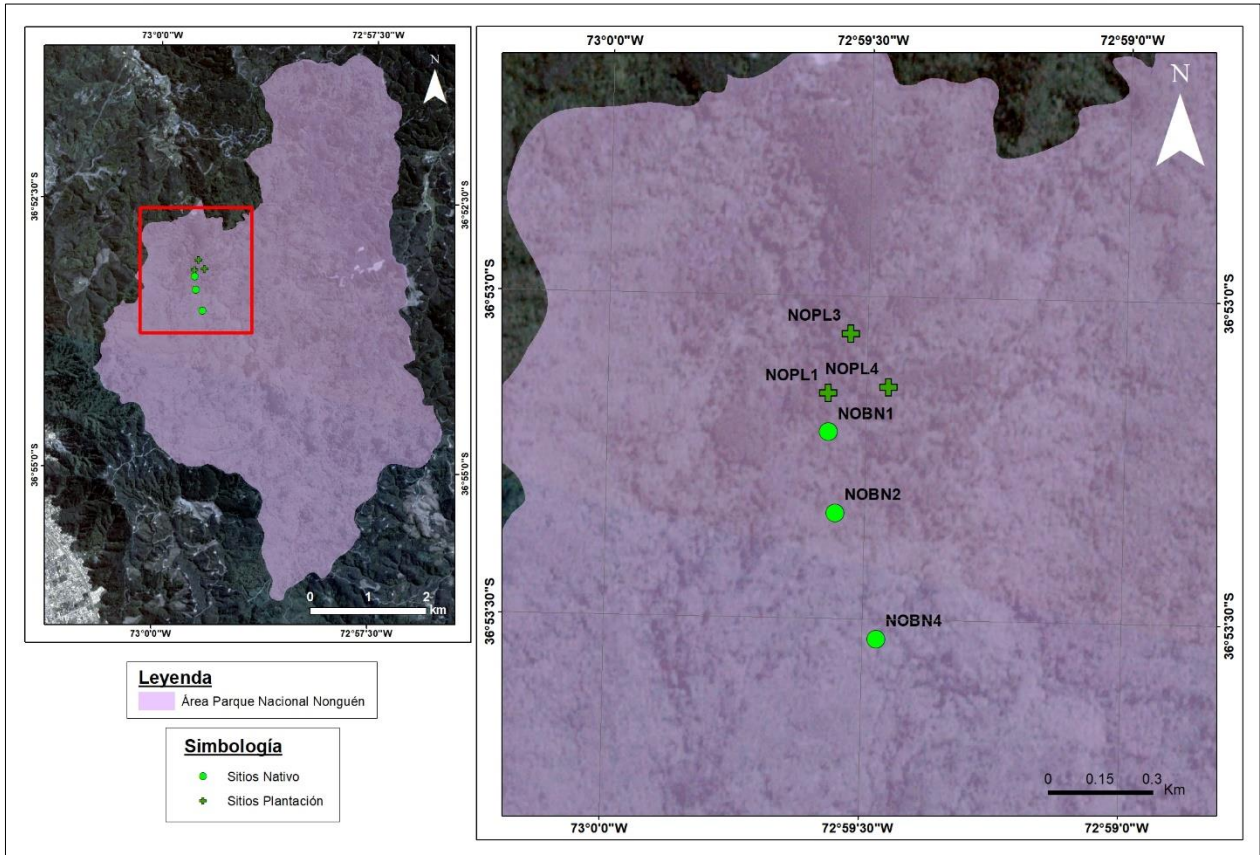


Figura 4.1: Mapa sitios de estudio.

4.1. Caracterización física de los suelos

En la descripción *in situ* de cada perfil de suelo se determinaron sus principales características físicas, registrando en una tabla la profundidad de cada horizonte y los parámetros de tipo de contacto entre horizontes, estructura del suelo, cantidad de raíces, poros y porcentaje de fragmentos rocosos (Anexo B1).

Todos los perfiles se encuentran a una cota aproximada de 250 m s.n.m., en la alta ladera. Tienen profundidades de 170 cm aproximadamente, dentro de lo cual, es posible identificar los distintos horizontes y variaciones morfológicas dentro de un mismo perfil.

Sitios bajo bosque nativo (NOBN): presentan límites o contactos medianamente definidos entre horizontes, en general son graduales (G) o claros (C). En los primeros 60 a 80 cm aproximadamente sus límites entre horizontes son mayormente lisos, sin embargo, a medida que profundizamos en el perfil, los límites se vuelven más ondulados. En la totalidad de los perfiles se identifican horizontes A y B (con algunos horizontes transicionales), en NOBN1 y NOBN3 se identifica además un horizonte Oi, o capa de acumulación de materia orgánica (Figuras 4.2; 4.3 y 4.4).

En cuanto a su estructura, que corresponde a la forma y tamaño de los terrones de suelo, la angularidad de los terrones (bloques) que lo conforman aumenta con la profundidad, y su tamaño es variado incluso dentro de un mismo horizonte, siendo en su mayoría unidades bien formadas y evidentes en el corte o en muestra de mano, solo en NOBN3 y NOBN4 se distingue un horizonte carente de estructura (masivo: ma) en su parte más profunda, horizontes B6 y B7, respectivamente (Figuras 4.3 y 4.4).

La cantidad de raíces contenidas varía de horizonte en horizonte, en general es mayor en los superiores y va disminuyendo a medida que descendemos en el perfil, llegando incluso a niveles con ausencia de éstas (horizonte B7 de NOBN4). Adicionalmente, se observa que en los niveles superiores hay mayor ocurrencia de raíces gruesas (5 - < 10 mm) que, en los inferiores, aunque en NOBN1, por ejemplo, las raíces casi alcanzan el último horizonte, pero en menos cantidad que en los horizontes superiores. Las raíces finas (1 - < 2 mm) por su parte se muestran en casi todos los niveles, siendo más abundantes en los horizontes superiores y llegando a conteos de más de 5 por área de 1 cm².

Sus poros van de muy finos (vf) a medios (m), con excepción de los horizontes B1 y B4 de NOBN1 y los tres primeros horizontes de NOBN4 (A1, A2, B1), que llegan a presentar poros gruesos (de entre 5 a 10 mm), pero menor a 1 por área de 10 cm² (dentro de un mismo horizonte). Adicionalmente se identifican poros intersticiales (huecos entre fragmentos de roca) en el horizonte Oi de NOBN1.

Casi en la totalidad de los horizontes de los perfiles se logran identificar fragmentos rocosos en cantidades variables que van desde un 1% hasta incluso 40%. En vista global, los mayores porcentajes se dan en horizontes más profundos, en los horizontes B, con tamaño que aumenta también con la profundidad. En particular, en NOBN1 los porcentajes mayores se dan en los horizontes B2 y B4, estos se identifican como horizontes clásticos o conglomerádicos, con bloques subangulares a subredondeados con tamaño menor o igual a 4 cm, y bloques angulares a subangulares de tamaño menor o igual a 15 cm respectivamente.



Figura 4.2: Perfil de suelo sitio NOBN1. A. Fotografía calicata; B. Perfil esquemático, mostrando los 7 horizontes desde Oi a B5 (letras naranjas).

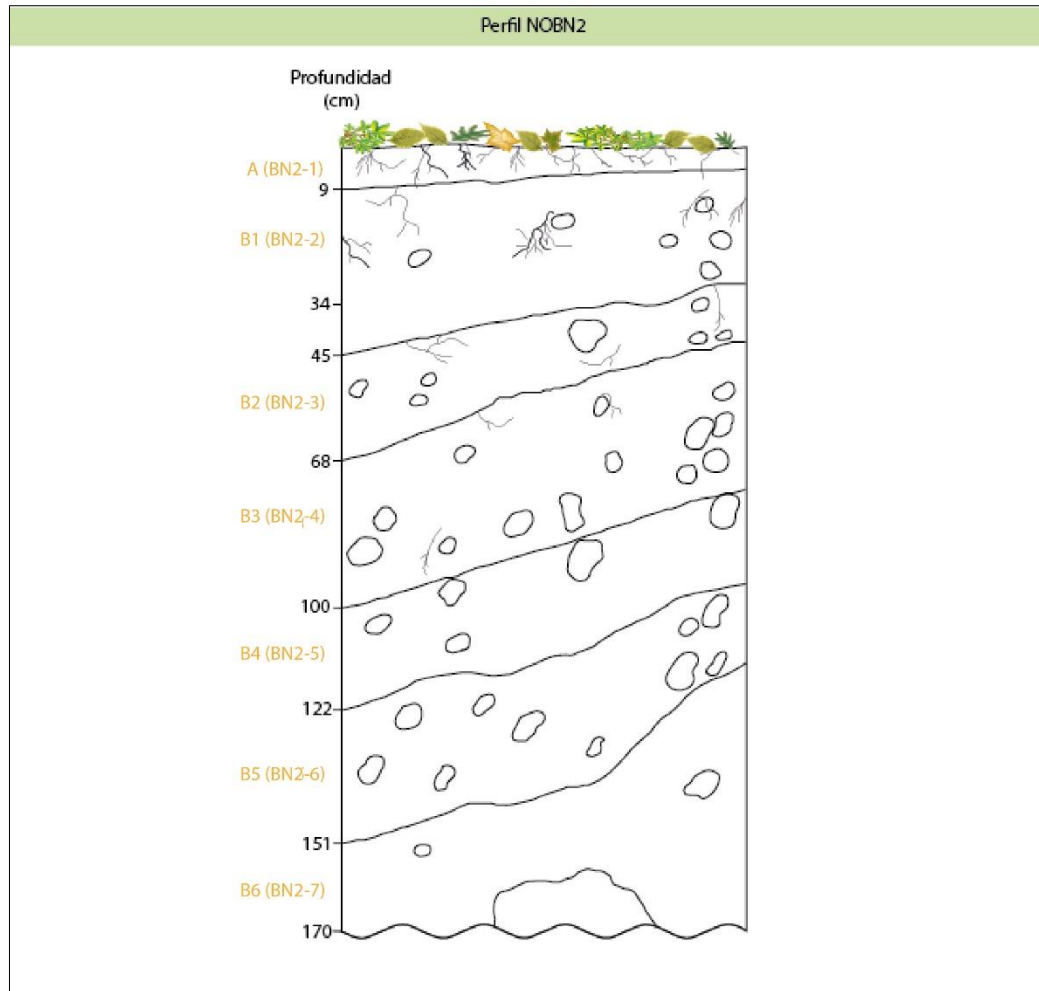


Figura 4.3: Perfil (esquemático) de suelo sitio NOBN2. A. Fotografía calicata; B. Perfil esquemático, mostrando los 7 horizontes desde A a B6 (letras naranjas).

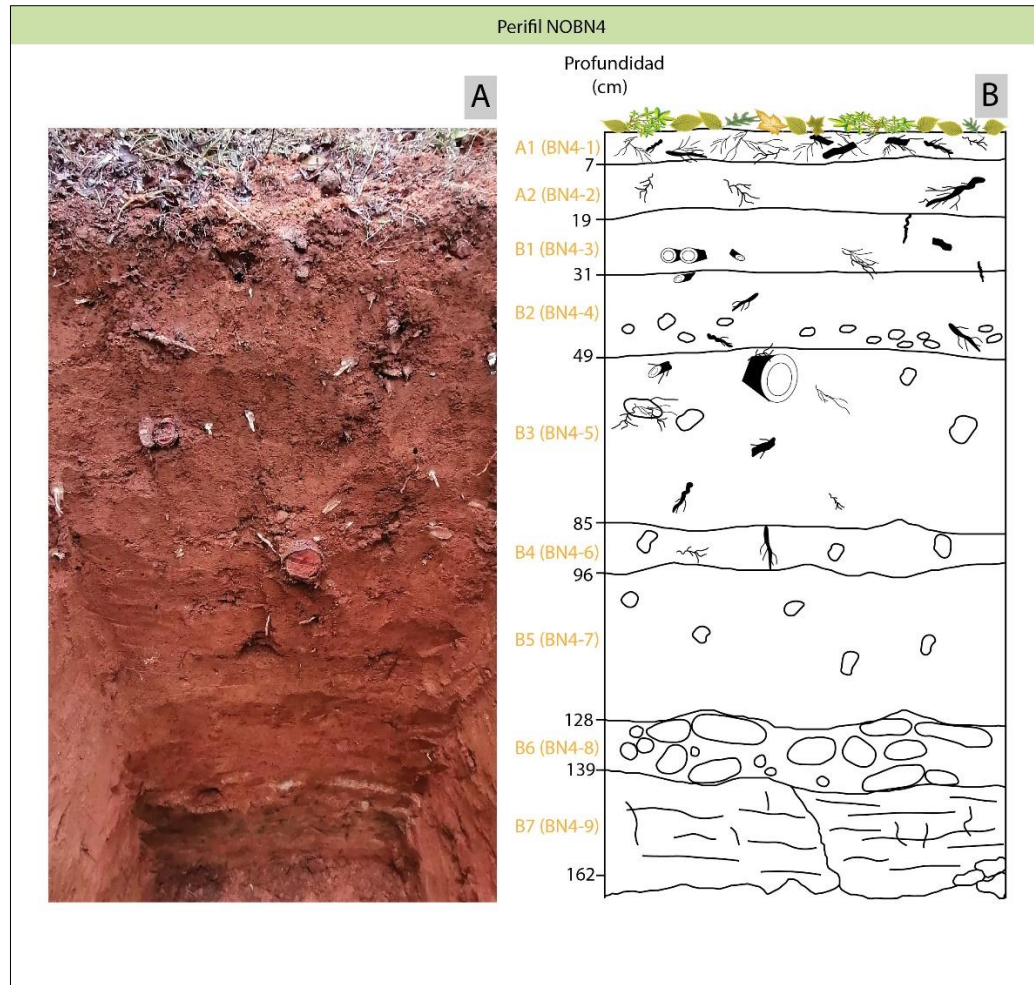


Figura 4.4: Perfil de suelo sitio NOBN4. A. Fotografía calicata; B. Perfil esquemático, mostrando los 9 horizontes desde A1 a B7 (letras naranjas).

Sitios bajo plantación: Corresponde a los sitios NOPL1 (Fig. 4.5), NOPL3 (Fig. 4.6) y NOPL4 (Fig. 4.7). En general estos perfiles presentan límites o contactos medianamente definidos (mejor que los de NOBN) entre horizontes, en general son claros (C) y algunos graduales (G), esto último mayormente ocurre en el perfil de suelo NOPL3. En los horizontes superficiales (primeros 30 cm aproximadamente), los límites son lisos, en cambio a mayor profundidad, son más bien ondulados. NOPL3 difiere un poco de los otros perfiles, ya que solo presenta un límite liso superficial (24 cm), y todo el resto, hasta los 107 cm de profundidad son ondulados, desde donde nuevamente aparecen límites lisos (desde horizonte B7 a B9).

En la totalidad de los perfiles se identifican horizontes A y B, y algunos transicionales entre estos, en NOPL4 se reconoce además un horizonte Cr, que corresponde a una capa de roca madre meteorizada en el último horizonte visible de la calicata, desde los 143-162 cm de profundidad. Los primeros centímetros de NOPL3 corresponden a solo materia orgánica, por lo que corresponden a horizontes O, los que fueron subdivididos en Oi1 (de los 0 a los 3 cm), Oi2 (de los

3 a los 4 cm) y Oi3 (de los 4 a los 5 cm de profundidad), debido a algunas diferencias en el grado de descomposición de la materia orgánica,

En lo que respecta a estructura, los terrones son mayormente angulares con mucha menor cantidad de subangulares (NOPL2 excepcionalmente tiene más subangulares que angulares), la angularidad aumenta con la profundidad y 2 de los perfiles tienen en sus horizontes más profundos, capas de estructura masiva (NOPL1 y NOPL4). Los terrones que conforman estos suelos en general están bien formados, por lo que son fácilmente identificables tanto en el perfil como en muestra de mano. Sus tamaños varían de muy fino a grueso, y van cambiando tanto a lo largo del perfil como dentro de un mismo horizonte, siendo más comunes los terrones medios y gruesos.

Las raíces contenidas en estos suelos van de muy finas a finas y, en pocos casos, gruesas. Se identifican en todos los horizontes, con excepción de NOPL2 que carece de estas a partir de los 132 cm de profundidad aproximadamente. En general son más abundantes en los niveles superiores (de 1 a < 5 por área de 1 cm², a de ≥ 5 por área de 1 cm²), más o menos hasta los primeros 60-70 cm de profundidad.

Sus poros son de variados tamaños, incluyen muy finos (< 1 mm), finos (1 a < 2 mm), medios (2 a < 5 mm) y gruesos (5 a < 10 mm), en NOPL4 se identifican además poros intersticiales (horizontes A1 y Cr). La cantidad por área varía bastante de perfil en perfil, NOPL1 tiene ≥ 5 por área de 1 cm² de poros finos (f) y muy finos (vf) a lo largo de todo el perfil, NOPL2 muestra esta abundancia solo en su horizonte A1 y en los otros horizontes disminuyen ambos (f y vf), con cantidades de 1 a < 5 por área y hasta < 1 por área, con disminución a medida que se profundiza en el perfil. NOPL3 es más parejo (como NOPL1) y la mayoría son medianamente abundantes, lo que se mantiene regular en todos los horizontes. Finalmente, NOPL4 igualmente mantiene cantidad y tamaño constante en sus horizontes medios (f y vf de 1 a < 5 por área de 1 cm²), y poros intersticiales tanto en su horizonte más superficial (A1), como en el más profundo (C) visible en la calicata.

El porcentaje de fragmentos rocosos varía de 0% a 40%. En particular, NOPL1 presenta menor cantidad, con varios horizontes carentes de estos y un porcentaje muy bajo en los que si tienen, con un máximo de solo 12% en el horizonte B1. De forma global, en los demás perfiles los porcentajes van de menos a más a medida que se baja en el perfil, sin embargo, en cierto punto (aproximadamente 125-130 cm) vuelven a disminuir. El que mayor porcentaje contiene (40%) corresponde al inmediatamente sobre el horizonte Cr en NOPL4. El tamaño de los clastos es variable, de unos pocos cm a 10 cm o más. Algunos de los horizontes son identificados como niveles conglomerádicos matriz soportados correspondientes probablemente a capas de depósitos coluviales.

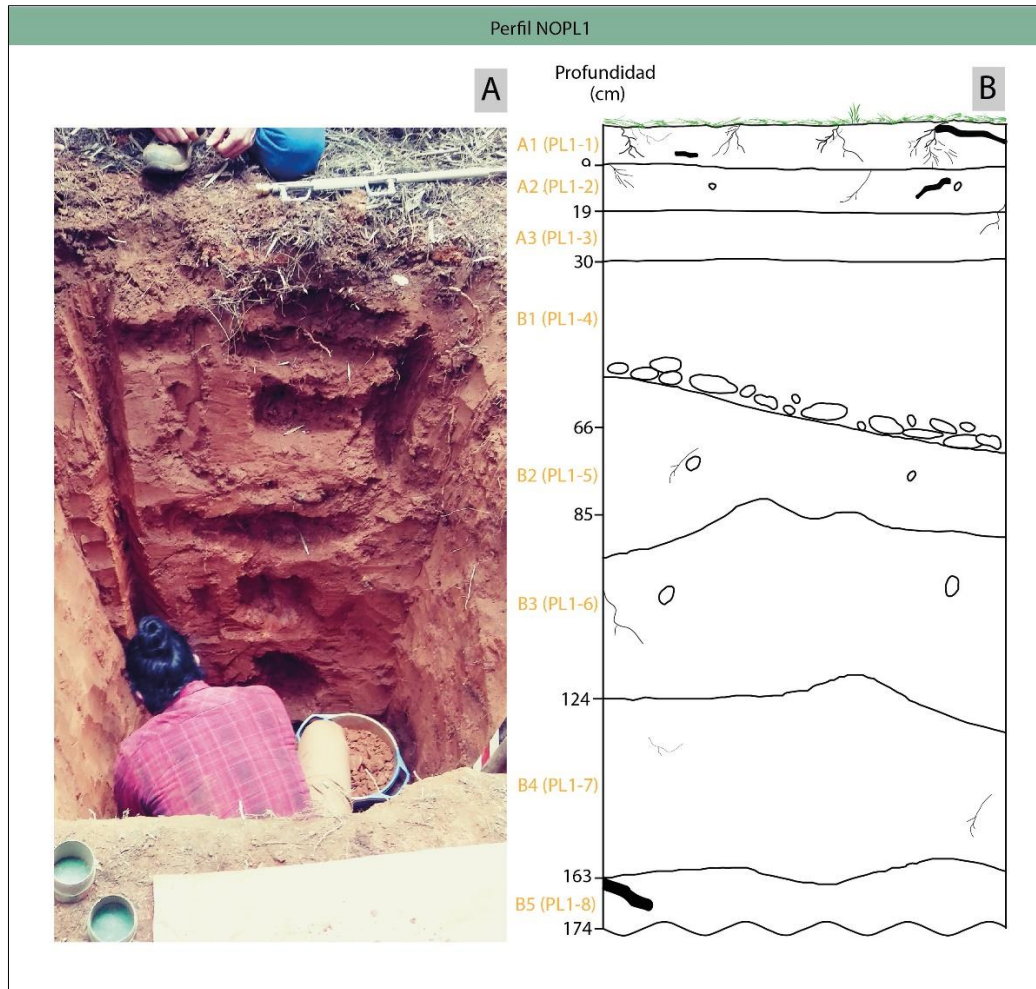


Figura 4.5: Perfil de suelo sitio NOPL1. A. Fotografía calicata; B. Perfil esquemático, mostrando los 8 horizontes desde A1 a B5 (letras naranjas).

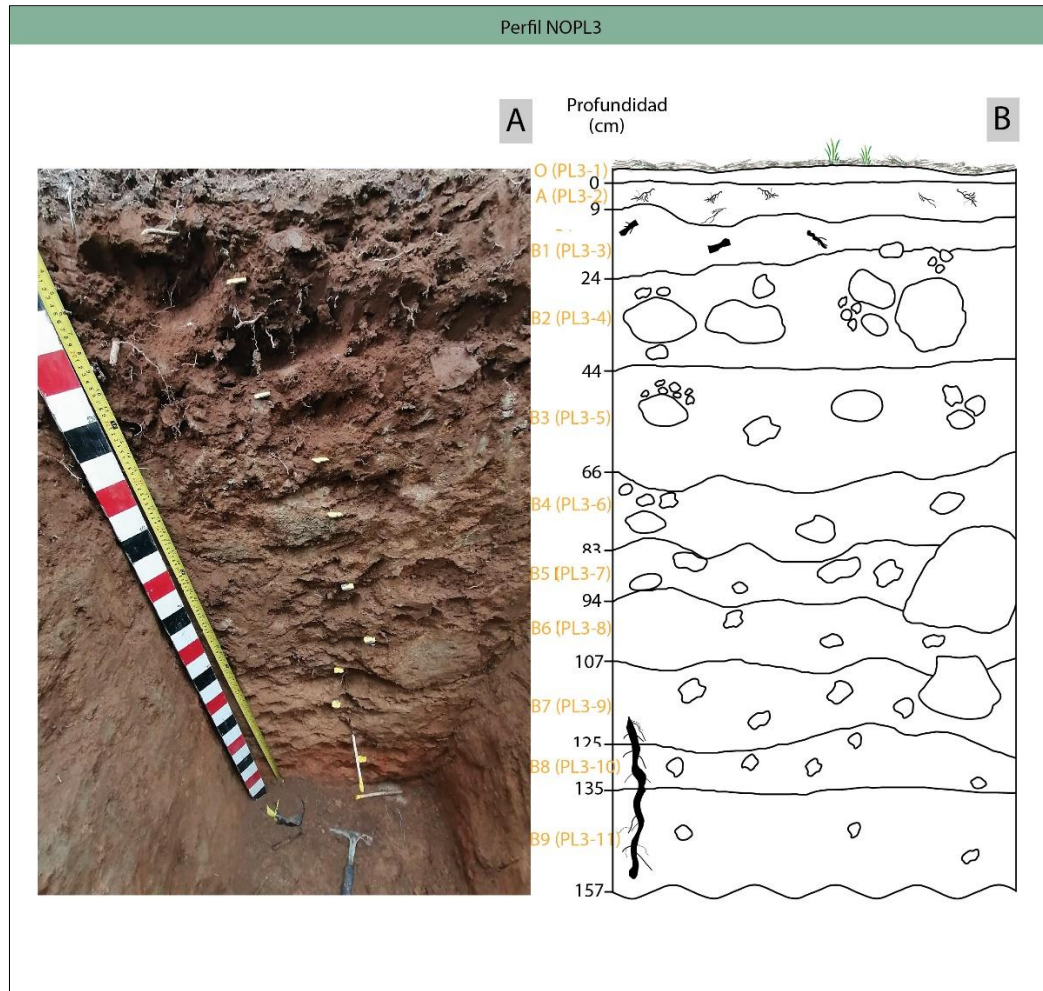


Figura 4.6: Perfil de suelo sitio NOPL3. A. Fotografía calicata; B. Perfil esquemático, mostrando los 11 horizontes desde O a B9 (letras naranjas).

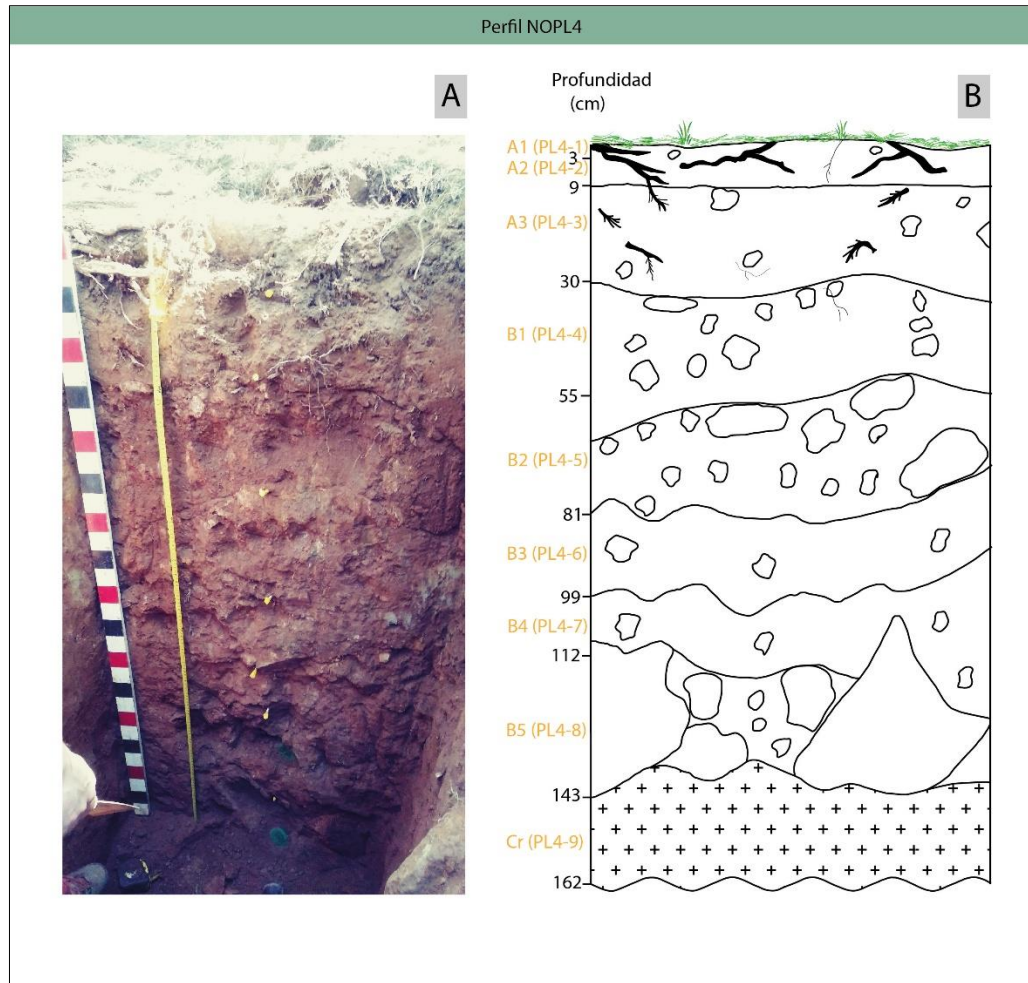


Figura 4.7: Perfil de suelo sitio NOPL4. A. Fotografía calicata; B. Perfil esquemático, mostrando los 9 horizontes desde A1 a Cr (letras naranjas).

4.2. Caracterización geoquímica de los suelos

Se trabaja con los datos de un total de 18 elementos químicos (Tabla 4.1), de los 55 analizados en cada muestra.

Tabla 4.1: Lista de los 18 elementos seleccionados

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ (T)	MnO	MgO	CaO
Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	V	Cr
Co	Cu	Zn	Zr	Pb	As

4.2.1 Análisis estadísticos univariabes

Con el fin de tener una mejor comprensión inicial de la distribución y variabilidad en la concentración de los componentes de cada suelo, se elaboran diagramas *box plot* y se calculan los estadísticos básicos para cada perfil de suelo (Tablas 4.2 a 4.7).

Tabla 4.2: Estadísticos principales del perfil NOBN1.

BN1 Mayores										
Estadístico	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ (T)	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅
Máximo	54.43	23.86	10.01	0.20	0.87	0.70	0.29	1.75	1.27	0.17
Mínimo	47.77	16.11	7.10	0.06	0.56	0.14	0.17	1.17	0.93	0.12
Q1	48.10	18.91	8.06	0.11	0.69	0.22	0.23	1.19	1.08	0.12
Q2	49.77	21.25	9.39	0.16	0.80	0.27	0.26	1.50	1.24	0.13
Q3	54.27	23.19	9.82	0.20	0.87	0.28	0.27	1.72	1.25	0.14
Mediana	49.77	21.25	9.39	0.16	0.80	0.27	0.26	1.50	1.24	0.13
Media	50.88	20.85	8.99	0.15	0.77	0.30	0.25	1.46	1.17	0.13
Desviación estándar (D.E.)	2.59	2.57	1.00	0.05	0.11	0.17	0.04	0.23	0.11	0.02
Varianza	6.71	6.60	0.99	0.00	0.01	0.03	0.00	0.05	0.01	0.00
Coefficiente de variación (%)	5.09	12.32	11.08	30.94	13.85	55.61	14.78	15.51	9.76	12.50
Media + 3.5 D.E.	59.95	29.84	12.48	0.32	1.15	0.89	0.38	2.25	1.57	0.19
Media - 2.5 D.E.	41.81	11.86	5.50	-0.01	0.40	-0.29	0.12	0.67	0.77	0.08
BN1 Trazas										
Estadístico	V	Cr	Co	Cu	Zn	Zr	Pb	As		
Máximo	191.00	80.00	19.00	60.00	100.00	278.00	27.00	15.00		
Mínimo	135.00	70.00	12.00	40.00	90.00	215.00	17.00	7.00		
Q1	152.00	70.00	15.00	40.00	90.00	252.00	21.00	7.00		
Q2	184.00	80.00	16.00	50.00	100.00	256.00	23.00	11.00		
Q3	191.00	80.00	19.00	60.00	100.00	266.00	25.00	13.00		
Mediana	184.00	80.00	16.00	50.00	100.00	256.00	23.00	11.00		
Media	172.57	77.14	16.29	50.00	95.71	254.43	22.71	10.29		
Desviación estándar (D.E.)	20.26	4.52	2.37	9.26	4.95	18.12	2.91	2.86		
Varianza	410.53	20.41	5.63	85.71	24.49	328.24	8.49	8.20		
Coefficiente de variación (%)	11.74	5.86	14.57	18.52	5.17	7.12	12.83	27.85		
Media + 3.5 D.E.	243.49	92.95	24.59	82.40	113.03	317.84	32.91	20.31		
Media - 2.5 D.E.	101.66	61.33	7.98	17.60	78.39	191.02	12.52	0.26		

Tabla 4.3: Estadísticos principales del perfil NOBN2.

BN2 Mayores										
Estadístico	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ (T)	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅
Máximo	60.16	21.93	9.42	0.12	1.34	0.43	0.33	2.05	1.24	0.13
Mínimo	48.70	16.84	7.18	0.05	0.89	0.04	0.11	1.59	0.92	0.10
Q1	52.34	17.82	7.32	0.05	0.90	0.04	0.13	1.63	0.95	0.10
Q2	53.15	19.91	8.05	0.05	0.91	0.06	0.21	1.85	1.07	0.11
Q3	58.25	21.80	9.10	0.07	1.06	0.20	0.29	1.96	1.22	0.12
Mediana	53.15	19.91	8.05	0.05	0.91	0.06	0.21	1.85	1.07	0.11
Media	54.49	19.79	8.22	0.07	0.99	0.13	0.21	1.81	1.06	0.11
Desviación estándar (D.E.)	3.65	1.80	0.85	0.02	0.15	0.13	0.07	0.16	0.12	0.01
Varianza	13.33	3.24	0.73	0.00	0.02	0.02	0.01	0.03	0.01	0.00
Coefficiente de variación (%)	6.70	9.09	10.38	37.87	15.26	102.79	35.73	8.98	11.35	8.88
Media + 3.5 D.E.	67.27	26.09	11.21	0.15	1.52	0.60	0.47	2.37	1.48	0.15
Media - 3.5 D.E.	41.71	13.49	5.23	-0.02	0.46	-0.34	-0.05	1.24	0.64	0.08
BN2 Trazas										
Estadístico	V	Cr	Co	Cu	Zn	Zr	Pb	As		
Máximo	188.00	80.00	15.00	70.00	100.00	384.00	29.00	17.00		
Mínimo	124.00	70.00	11.00	40.00	70.00	202.00	10.00	7.00		
Q1	128.00	70.00	12.00	40.00	80.00	253.00	19.00	8.00		
Q2	156.00	70.00	13.00	50.00	90.00	278.00	22.00	13.00		
Q3	184.00	80.00	13.00	60.00	100.00	339.00	25.00	16.00		
Mediana	156.00	70.00	13.00	50.00	90.00	278.00	22.00	13.00		
Media	156.14	74.29	12.71	51.43	87.14	287.57	21.57	12.00		
Desviación estándar (D.E.)	23.69	4.95	1.16	11.25	10.30	54.64	5.53	3.70		
Varianza	561.27	24.49	1.35	126.53	106.12	2985.39	30.53	13.71		
Coefficiente de variación (%)	15.17	6.66	9.13	21.87	11.82	19.00	25.61	30.86		
Media + 3.5 D.E.	239.06	91.61	16.78	90.80	123.20	478.81	40.91	24.96		
Media - 3.5 D.E.	73.22	56.97	8.65	12.06	51.09	96.34	2.23	-0.96		

Tabla 4.4: Estadísticos principales del perfil NOBN4.

BN4 Mayores										
Estadístico	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ (T)	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅
Máximo	67.72	19.99	7.16	0.09	0.47	0.18	0.18	2.67	1.04	0.14
Mínimo	56.39	16.18	5.26	0.02	0.22	0.02	0.10	1.12	0.61	0.08
Q1	59.99	16.40	5.69	0.03	0.27	0.02	0.11	1.27	0.70	0.09
Q2	62.61	17.65	6.68	0.04	0.31	0.03	0.12	1.66	0.78	0.10
Q3	66.01	17.94	6.96	0.07	0.34	0.10	0.16	1.98	1.00	0.12
Mediana	62.61	17.65	6.68	0.04	0.31	0.03	0.12	1.66	0.78	0.10
Media	62.84	17.52	6.37	0.05	0.31	0.06	0.13	1.67	0.84	0.10
Desviación estándar (D.E.)	3.53	1.10	0.66	0.02	0.07	0.05	0.03	0.46	0.15	0.02
Varianza	12.43	1.21	0.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.21	0.02	0.00
Coefficiente de variación (%)	5.61	6.28	10.30	48.89	21.34	90.95	21.77	27.69	18.02	17.12
Media + 3.5 D.E.	75.18	21.37	8.66	0.13	0.55	0.25	0.23	3.29	1.36	0.16
Media - 3.5 D.E.	50.50	13.67	4.07	-0.03	0.08	-0.13	0.03	0.05	0.31	0.04
BN4 Trazas										
Estadístico	V	Cr	Co	Cu	Zn	Zr	Pb	As		
Máximo	146.00	50.00	17.00	40.00	70.00	361.00	31.00	62.00		
Mínimo	86.00	30.00	3.00	20.00	40.00	223.00	10.00	9.00		
Q1	98.00	30.00	4.00	20.00	40.00	267.50	16.50	13.00		
Q2	128.00	50.00	6.00	30.00	50.00	306.00	26.00	16.00		
Q3	139.50	50.00	8.00	30.00	50.00	322.00	28.00	29.00		
Mediana	128.00	50.00	6.00	30.00	50.00	306.00	26.00	16.00		
Media	119.00	41.11	7.00	27.78	48.89	298.00	23.00	22.89		
Desviación estándar (D.E.)	21.18	9.94	3.92	6.29	8.75	37.87	6.72	15.86		
Varianza	448.44	98.77	15.33	39.51	76.54	1434.44	45.11	251.65		
Coefficiente de variación (%)	17.80	24.17	55.94	22.63	17.90	12.71	29.20	69.31		
Media + 3.5 D.E.	193.12	75.89	20.71	49.78	79.51	430.56	46.51	78.41		
Media - 3.5 D.E.	44.88	6.33	-6.71	5.78	18.27	165.44	-0.51	-32.63		

Tabla 4.5: Estadísticos principales del perfil NOPL1.

PL1 Mayores										
Estadístico	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ (T)	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅
Máximo	66.64	18.64	6.75	0.11	0.43	0.26	0.21	2.35	0.99	0.09
Mínimo	63.28	12.11	5.37	0.02	0.31	0.04	0.09	1.21	0.60	0.05
Q1	63.58	14.11	5.64	0.03	0.36	0.05	0.10	1.28	0.73	0.06
Q2	65.09	16.25	6.01	0.05	0.41	0.09	0.17	1.38	0.89	0.07
Q3	66.33	18.43	6.24	0.09	0.42	0.20	0.20	1.73	0.98	0.08
Mediana	65.09	16.25	6.01	0.05	0.41	0.09	0.17	1.38	0.89	0.07
Media	65.03	16.09	6.00	0.06	0.39	0.12	0.15	1.53	0.86	0.07
Desviación estándar (D.E.)	1.23	2.24	0.40	0.03	0.04	0.08	0.04	0.36	0.13	0.01
Varianza	1.51	5.01	0.16	0.00	0.00	0.01	0.00	0.13	0.02	0.00
Coefficiente de variación (%)	1.89	13.91	6.74	52.37	9.93	66.80	29.26	23.36	15.45	17.50
Media + 3 D.E.	69.33	23.92	7.41	0.17	0.53	0.40	0.31	2.77	1.32	0.11
Media - 2 D.E.	60.74	8.25	4.58	-0.05	0.26	-0.16	0.00	0.28	0.39	0.03
PL1 Trazas										
Estadístico	V	Cr	Co	Cu	Zn	Zr	Pb	As		
Máximo	126.00	60.00	8.00	50.00	70.00	362.00	27.00	20.00		
Mínimo	94.00	40.00	5.00	20.00	40.00	212.00	10.00	8.00		
Q1	105.50	40.00	5.00	20.00	50.00	250.25	16.25	8.00		
Q2	112.00	50.00	6.00	30.00	55.00	314.50	18.00	12.50		
Q3	122.75	50.00	8.00	37.50	60.00	346.00	24.75	18.00		
Mediana	112.00	50.00	6.00	30.00	55.00	314.50	18.00	12.50		
Media	112.38	47.50	6.38	30.00	55.00	302.25	18.88	13.13		
Desviación estándar (D.E.)	9.92	6.61	1.41	10.00	8.66	50.33	5.30	4.73		
Varianza	98.48	43.75	1.98	100.00	75.00	2532.69	28.11	22.36		
Coefficiente de variación (%)	8.83	13.93	22.10	33.33	15.75	16.65	28.09	36.03		
Media + 3 D.E.	147.11	70.65	11.31	65.00	85.31	478.39	37.43	29.67		
Media - 2 D.E.	77.64	24.35	1.44	-5.00	24.69	126.11	0.32	-3.42		

Tabla 4.6: Estadísticos principales del perfil NOPL3.

PL3 Mayores										
Estadístico	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ (T)	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅
Máximo	62.49	20.45	8.89	0.08	0.75	0.25	0.29	2.99	1.14	0.15
Mínimo	58.49	15.01	6.35	0.02	0.44	0.04	0.21	1.48	0.93	0.10
Q1	59.50	17.54	6.72	0.02	0.51	0.04	0.22	1.87	0.96	0.11
Q2	60.81	19.25	7.12	0.04	0.58	0.08	0.23	2.45	1.03	0.11
Q3	61.75	20.08	7.77	0.07	0.70	0.18	0.27	2.67	1.06	0.13
Mediana	60.81	19.25	7.12	0.04	0.58	0.08	0.23	2.45	1.03	0.11
Media	60.67	18.74	7.32	0.04	0.59	0.11	0.24	2.32	1.02	0.12
Desviación estándar (D.E.)	1.32	1.73	0.78	0.02	0.10	0.07	0.03	0.48	0.06	0.02
Varianza	1.76	2.98	0.61	0.00	0.01	0.01	0.00	0.23	0.00	0.00
Coefficiente de variación	2.18	9.21	10.67	50.47	16.21	67.13	11.30	20.81	5.98	12.72
Media + 3 D.E.	65.30	24.78	10.05	0.12	0.93	0.36	0.33	4.00	1.24	0.17
Media - 2 D.E.	56.03	12.70	4.58	-0.03	0.26	-0.15	0.14	0.63	0.81	0.07
PL3 Trazas										
Estadístico	V	Cr	Co	Cu	Zn	Zr	Pb	As		
Máximo	185.00	90.00	14.00	40.00	100.00	290.00	31.00	21.00		
Mínimo	135.00	60.00	6.00	30.00	50.00	247.00	12.00	8.00		
Q1	151.75	67.50	6.75	30.00	57.50	257.75	16.50	8.75		
Q2	164.00	75.00	9.00	40.00	75.00	261.50	21.00	12.00		
Q3	170.25	80.00	11.00	40.00	82.50	275.25	23.50	18.00		
Mediana	164.00	75.00	9.00	40.00	75.00	261.50	21.00	12.00		
Media	161.80	74.00	9.10	37.00	72.00	265.60	20.70	13.10		
Desviación estándar (D.E.)	14.43	9.17	2.55	4.58	16.00	11.75	5.04	4.57		
Varianza	208.16	84.00	6.49	21.00	256.00	138.04	25.41	20.89		
Coefficiente de variación (%)	8.92	12.39	28.00	12.39	22.22	4.42	24.35	34.89		
Media + 3 D.E.	212.30	106.08	18.02	53.04	128.00	306.72	38.34	29.10		
Media - 2 D.E.	111.30	41.92	0.18	20.96	16.00	224.48	3.06	-2.90		

Tabla 4.7: Estadísticos principales del perfil NOPL4.

PL4 Mayores										
Estadístico	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ (T)	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅
Máximo	65.04	20.29	7.43	0.15	1.18	0.38	0.29	2.86	1.02	0.12
Mínimo	53.58	12.90	5.31	0.07	0.57	0.07	0.21	1.67	0.72	0.09
Q1	60.21	16.25	5.95	0.07	0.67	0.07	0.23	1.92	0.78	0.10
Q2	61.89	17.01	6.47	0.09	0.77	0.10	0.24	2.44	0.89	0.10
Q3	63.48	18.88	6.88	0.13	0.92	0.22	0.28	2.78	0.98	0.12
Mediana	61.89	17.01	6.47	0.09	0.77	0.10	0.24	2.44	0.89	0.10
Media	61.28	17.17	6.40	0.10	0.80	0.15	0.25	2.32	0.88	0.10
Desviación estándar (D.E.)	3.16	2.00	0.62	0.03	0.17	0.10	0.03	0.42	0.10	0.01
Varianza	9.97	3.98	0.38	0.00	0.03	0.01	0.00	0.18	0.01	0.00
Coefficiente de variación (%)	5.15	11.62	9.62	29.40	21.53	67.05	10.64	18.12	11.45	10.20
Media + 3 D.E.	72.33	24.16	8.56	0.20	1.40	0.50	0.34	3.79	1.24	0.14
Media - 2 D.E.	50.23	10.19	4.25	0.00	0.20	-0.20	0.15	0.85	0.53	0.07
PL4 Trazas										
Estadístico	V	Cr	Co	Cu	Zn	Zr	Pb	As		
Máximo	150.00	90.00	13.00	40.00	110.00	304.00	29.00	20.00		
Mínimo	106.00	60.00	8.00	20.00	15.00	209.00	2.50	10.00		
Q1	112.50	60.00	8.50	30.00	75.00	223.00	15.50	12.00		
Q2	126.00	70.00	10.00	30.00	90.00	240.00	24.00	14.00		
Q3	133.00	75.00	11.50	35.00	105.00	279.00	27.00	17.50		
Mediana	126.00	70.00	10.00	30.00	90.00	240.00	24.00	14.00		
Media	124.78	70.00	10.22	31.11	83.89	248.11	20.50	14.33		
Desviación estándar (D.E.)	13.02	9.43	1.62	5.67	27.26	30.36	8.04	3.13		
Varianza	169.51	88.89	2.62	32.10	743.21	921.65	64.67	9.78		
Coefficiente de variación (%)	10.43	13.47	15.83	18.21	32.50	12.24	39.23	21.82		
Media + 3 D.E.	170.35	103.00	15.88	50.94	179.31	354.37	48.65	25.28		
Media - 2 D.E.	79.21	37.00	4.56	11.28	-11.53	141.86	-7.65	3.39		

En el caso de los gráficos de bigote y caja (*box plots*), se hicieron de forma individual para cada elemento en cada perfil de suelo (Anexo B5 a B10), con el objetivo de tener una visualización más clara de la información que nos entregan, por ejemplo, datos *outliers* (Tabla 4.8) o el valor de la mediana. Además, se elaboran otros comparativos multielementales por perfil (Anexo B11 y B12) y por tipo de uso de suelo (Figura 4.8) para dar una perspectiva más global de los valores para NOBN y NOPL.

Tabla 4.8: Concentraciones elementos. En morado se destacan los *outliers* identificados con los *box plots*.

Analizado	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ (T)	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	V	Cr	Co	Cu	Zn	Zr	Pb	As		
Unidad	w%	w%	w%	w%	w%	w%	w%	w%	w%	w%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm		
Método de Análisis	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP		
Muestras Nativo	BN1-1	49.77	16.11	7.10	0.20	0.80	0.70	0.27	1.58	0.93	0.17	135.00	70.00	12.00	40.00	100.00	215.00	23.00	13.00	
	BN1-2	54.43	18.91	8.06	0.20	0.86	0.28	0.29	1.75	1.08	0.12	152.00	80.00	15.00	40.00	90.00	278.00	17.00	11.00	
	BN1-3	54.27	19.77	8.81	0.16	0.87	0.22	0.27	1.72	1.18	0.13	168.00	80.00	16.00	40.00	100.00	266.00	25.00	11.00	
	BN1-4	52.37	21.25	9.39	0.18	0.87	0.27	0.26	1.50	1.24	0.12	184.00	80.00	18.00	50.00	100.00	261.00	23.00	7.00	
	BN1-5	48.10	23.19	9.82	0.16	0.75	0.28	0.24	1.19	1.24	0.14	191.00	80.00	19.00	60.00	90.00	252.00	21.00	7.00	
	BN1-6	49.45	22.87	9.76	0.11	0.69	0.23	0.23	1.28	1.27	0.14	191.00	80.00	19.00	60.00	100.00	256.00	23.00	8.00	
	BN1-7	47.77	23.86	10.01	0.06	0.56	0.14	0.17	1.17	1.25	0.12	187.00	70.00	15.00	60.00	90.00	253.00	27.00	15.00	
	BN2-1	48.70	16.84	7.55	0.12	0.90	0.43	0.33	1.59	1.07	0.11	156.00	70.00	12.00	40.00	70.00	202.00	10.00	7.00	
	BN2-2	53.15	19.91	8.94	0.07	0.91	0.20	0.29	1.63	1.24	0.10	184.00	80.00	15.00	60.00	80.00	269.00	19.00	9.00	
	BN2-3	52.54	21.80	9.42	0.06	0.91	0.10	0.22	1.68	1.22	0.10	188.00	80.00	13.00	60.00	90.00	288.00	22.00	8.00	
	BN2-4	52.34	21.93	9.10	0.05	0.89	0.06	0.21	1.88	1.07	0.11	169.00	80.00	12.00	70.00	100.00	253.00	29.00	17.00	
	BN2-5	56.30	20.90	8.05	0.05	0.94	0.04	0.17	2.05	0.96	0.12	144.00	70.00	13.00	50.00	90.00	278.00	24.00	14.00	
	BN2-6	58.25	19.32	7.32	0.05	1.06	0.04	0.13	1.96	0.92	0.13	128.00	70.00	11.00	40.00	80.00	339.00	22.00	13.00	
	BN2-7	60.16	17.82	7.18	0.05	1.34	0.04	0.11	1.85	0.95	0.11	124.00	70.00	13.00	40.00	100.00	384.00	25.00	16.00	
	BN4-1	56.39	16.18	6.68	0.08	0.31	0.18	0.16	1.12	0.97	0.10	136.00	50.00	8.00	40.00	40.00	272.00	10.00	13.00	
	BN4-2	59.54	17.46	7.12	0.06	0.32	0.13	0.16	1.21	1.04	0.09	146.00	50.00	8.00	30.00	40.00	306.00	14.00	13.00	
	BN4-3	61.32	18.09	7.16	0.04	0.28	0.07	0.12	1.33	1.03	0.08	143.00	50.00	7.00	30.00	50.00	317.00	19.00	9.00	
	BN4-4	62.61	17.73	6.69	0.04	0.25	0.05	0.12	1.42	0.92	0.09	131.00	50.00	6.00	30.00	50.00	305.00	24.00	20.00	
	BN4-5	65.54	17.65	5.94	0.02	0.22	0.03	0.11	1.66	0.74	0.10	103.00	30.00	4.00	20.00	40.00	308.00	26.00	19.00	
	BN4-6	67.72	16.50	5.26	0.02	0.29	0.02	0.10	1.82	0.66	0.09	86.00	30.00	3.00	20.00	50.00	327.00	28.00	16.00	
	BN4-7	66.18	16.30	6.22	0.03	0.33	0.02	0.11	1.68	0.78	0.12	105.00	30.00	4.00	20.00	50.00	361.00	31.00	16.00	
	BN4-8	65.84	17.79	5.44	0.04	0.34	0.02	0.10	2.13	0.61	0.11	93.00	30.00	6.00	30.00	50.00	263.00	27.00	38.00	
	BN4-9	60.44	19.99	6.80	0.09	0.47	0.02	0.18	2.67	0.78	0.14	128.00	50.00	17.00	30.00	70.00	223.00	28.00	62.00	
	Muestras Plantación	PL1-1	63.28	12.11	5.37	0.11	0.39	0.26	0.21	1.21	0.93	0.09	111.00	50.00	7.00	30.00	60.00	302.00	18.00	11.00
		PL1-2	65.12	13.84	5.85	0.09	0.41	0.21	0.20	1.29	0.98	0.07	119.00	50.00	8.00	20.00	50.00	328.00	10.00	8.00
		PL1-3	65.06	14.93	6.16	0.08	0.42	0.18	0.19	1.32	0.99	0.06	124.00	50.00	8.00	30.00	70.00	302.00	18.00	8.00
		PL1-4	66.09	15.52	6.26	0.06	0.43	0.13	0.17	1.54	0.98	0.06	126.00	60.00	8.00	30.00	60.00	327.00	17.00	8.00
PL1-5		63.33	18.64	5.85	0.03	0.41	0.05	0.16	2.35	0.71	0.05	105.00	50.00	5.00	40.00	50.00	233.00	16.00	14.00	
PL1-6		66.64	18.17	5.57	0.02	0.31	0.04	0.12	1.79	0.60	0.08	94.00	40.00	5.00	50.00	40.00	212.00	18.00	20.00	
PL1-7		64.34	18.52	6.75	0.03	0.35	0.05	0.09	1.28	0.85	0.07	113.00	40.00	5.00	20.00	50.00	352.00	27.00	18.00	
PL1-8		66.41	16.97	6.16	0.03	0.42	0.05	0.09	1.43	0.82	0.08	107.00	40.00	5.00	20.00	60.00	362.00	27.00	18.00	
PL3-1		62.20	15.01	6.35	0.08	0.57	0.25	0.28	1.48	1.02	0.10	135.00	60.00	10.00	30.00	80.00	258.00	12.00	8.00	
PL3-2		60.45	16.25	7.00	0.08	0.62	0.22	0.29	1.53	1.09	0.11	153.00	60.00	11.00	40.00	80.00	262.00	15.00	8.00	
PL3-3		61.57	17.97	7.17	0.06	0.69	0.16	0.26	1.98	1.14	0.11	163.00	70.00	11.00	40.00	80.00	290.00	17.00	9.00	
PL3-4		60.29	19.96	7.24	0.05	0.75	0.09	0.22	2.38	1.01	0.11	166.00	80.00	14.00	40.00	100.00	267.00	23.00	9.00	
PL3-5		59.80	19.20	7.49	0.04	0.72	0.10	0.23	2.26	1.04	0.11	165.00	80.00	11.00	40.00	90.00	274.00	21.00	11.00	
PL3-6		61.60	18.97	6.77	0.03	0.58	0.07	0.21	2.52	0.96	0.11	154.00	70.00	8.00	40.00	70.00	261.00	20.00	13.00	
PL3-7		62.49	19.29	6.58	0.02	0.51	0.07	0.21	2.61	0.93	0.12	148.00	70.00	7.00	40.00	60.00	247.00	21.00	18.00	
PL3-8		61.16	20.00	7.07	0.02	0.50	0.04	0.24	2.99	0.95	0.13	166.00	80.00	6.00	30.00	50.00	257.00	22.00	16.00	
PL3-9		58.49	20.45	8.59	0.02	0.44	0.04	0.23	2.76	1.05	0.15	185.00	80.00	6.00	30.00	50.00	279.00	25.00	21.00	
PL3-10		58.60	20.32	8.89	0.03	0.55	0.04	0.22	2.64	1.04	0.14	183.00	90.00	7.00	40.00	60.00	261.00	31.00	18.00	
PL4-1		53.58	12.90	5.31	0.15	0.57	0.38	0.27	1.67	0.86	0.12	113.00	60.00	9.00	20.00	15.00	229.00	2.50	12.00	
PL4-2		61.89	16.00	6.47	0.12	0.64	0.22	0.28	1.91	1.02	0.11	133.00	60.00	10.00	30.00	70.00	304.00	12.00	12.00	
PL4-3		61.15	16.50	6.63	0.14	0.69	0.22	0.29	1.92	0.99	0.12	132.00	70.00	11.00	30.00	90.00	247.00	19.00	14.00	
PL4-4		62.45	16.82	6.49	0.09	0.77	0.13	0.23	2.03	0.89	0.09	126.00	70.00	11.00	40.00	80.00	277.00	20.00	10.00	
PL4-5		61.22	19.02	7.43	0.09	1.18	0.10	0.23	2.72	0.97	0.10	150.00	90.00	13.00	40.00	110.00	281.00	26.00	12.00	
PL4-6		64.11	17.01	6.26	0.07	0.93	0.08	0.21	2.44	0.76	0.10	112.00	70.00	10.00	30.00	90.00	240.00	24.00	14.00	
PL4-7		65.04	17.29	5.69	0.07	0.73	0.07	0.22	2.49	0.72	0.09	106.00	60.00	8.00	30.00	90.00	227.00	24.00	18.00	
PL4-8		62.84	18.74	6.20	0.07	0.80	0.07	0.25	2.83	0.80	0.10	118.00	70.00	8.00	30.00	100.00	209.00	28.00	20.00	
PL4-9		59.26	20.29	7.13	0.10	0.90	0.07	0.24	2.86	0.93	0.10	133.00	80.00	12.00	30.00	110.00	219.00	29.00	17.00	

De los estadísticos básicos y la comparación de los diagramas *box plot* generales para los usos de suelo se tiene que, en la mayoría de los casos, las concentraciones de elementos tienen una mayor dispersión y asimetría en los suelos bajo bosque nativo. Por lo tanto, hay mayor variabilidad en sus

concentraciones. Un ejemplo claro de esto es el SiO_2 , que tiene un máximo de 67.72% y un mínimo de 47.77% en los suelos NOBN, mientras que para NOPL estos valores son menores y más cercanos entre ellos (66.64% y 53.58% respectivamente). Lo anterior, se evidencia también por su rango intercuartílico mayor (en *box plot*), y por posición de la mediana dentro de la caja, en la que está alejada del centro. Algo similar ocurre con otros elementos como el MgO (Figura 4.8.A y 4.8.B), V y el Zn (Figura 4.8.C y 4.8.D). Siguiendo esta línea de comparación, en la Figura 4.9 se observa que para el K_2O ocurre el caso contrario, este elemento muestra mayor dispersión y asimetría en NOPL, donde sus valores máximo y mínimo son más alejados que en NOBN, con 2.99-1.21% de K_2O bajo plantaciones y 2.67-1.12% bajo bosque nativo.

Por otro lado, se tiene que SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 tienen concentraciones un orden de magnitud superiores a las medidas para los demás elementos mayores, lo que dificulta la interpretación de los *box plot* para estos elementos, razón por la que se elaboran diagramas adicionales (Figura 4.9), tanto para NOBN como para NOPL, para visualizar mejor las distribuciones estadísticas de los elementos menos abundantes.

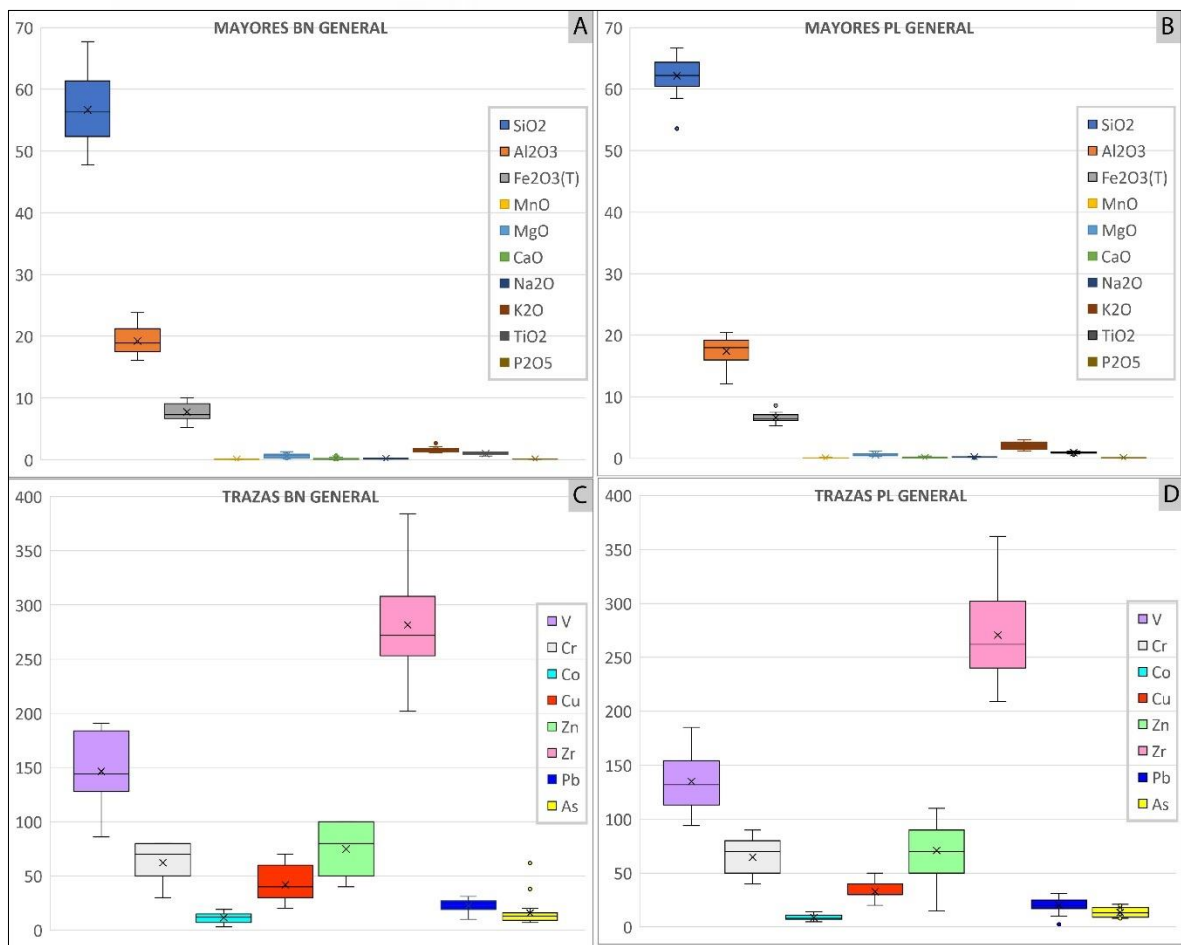


Figura 4.8: *Box plots* por tipo de suelo. (A): Para elementos mayores en sitios bajo bosque nativo (BN) en general; (B): Para elementos mayores en sitios bajo plantación (PL) en general; (C): Para elementos traza en BN en general; (D): Para elementos traza en PL en general.

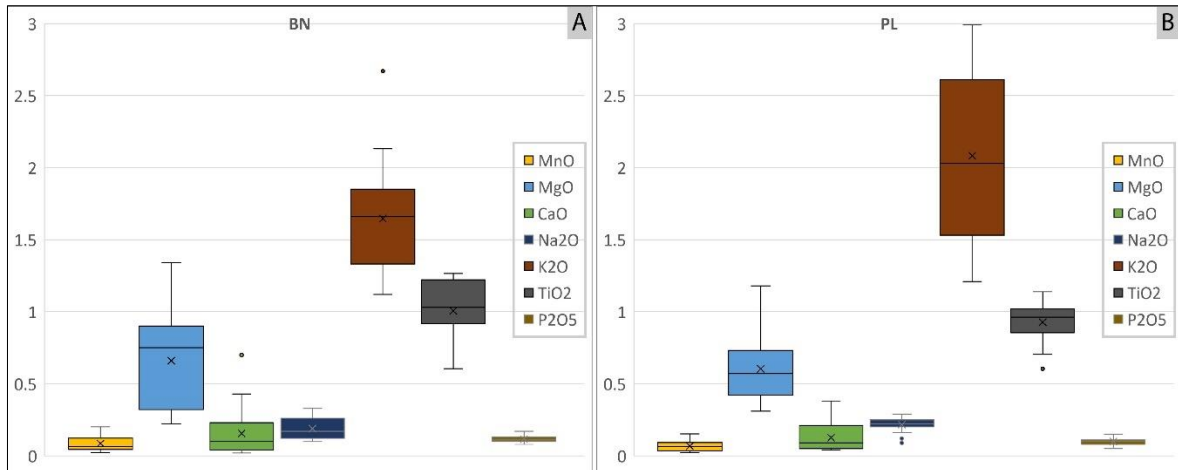


Figura 4.9: *Box plots* elementos mayores con concentraciones menores. (A) Para BN general; (B) Para PL general.

4.2.2. Diagramas multielemento

Se realiza un análisis comparativo de la geoquímica de los suelos de cada perfil mediante el uso de diagramas multielemento por perfil (Figura 4.10) y por uso de suelo (Figura 4.11), este último, elaborado con el promedio de los tres sitios para cada uso, Bosque Nativo (NOBN1, NOBN2, NOBN4) y Plantación (NOPL1, NOPL3, NOPL4). Todos los patrones resultantes se contrastan también con los valores promedio para los elementos en la roca madre (Batolito Costero del Sur) con el fin de tener un punto de vista inicial de las diferencias de proporción en cada constituyente de los suelos, con respecto del contenido en su material parental. De manera adicional, se muestran los diagramas multielemento con escala logarítmica (Figura 4.12), para una mejor visualización de las diferencias en los patrones.

Considerando los patrones por perfil (Figura 4.10), se distinguen variaciones tanto dentro de un mismo uso, como en el contraste de ambos. Nuevamente se observa que los elementos mayores con más concentración (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) son los con menor diferencia respecto a la roca madre y entre perfiles, sin embargo, al evaluar los patrones de los demás elementos (mayoritarios menores y traza), es posible distinguir algunas diferencias. Por ejemplo, BN4 (en los mayoritarios menores) posee en general menos concentración en todos y sigue un patrón relativamente cóncavo hacia arriba, mientras que BN1 y BN2 no presenta este patrón (Figura 4.10C). PL1 y PL3 siguen un patrón similar al de BN4, mientras que PL4 se asemeja más al trazado por BN2, pero con concentraciones un poco menores, excepto en K_2O . Para los elementos traza, nuevamente se tiene que BN4 es el sitio bajo bosque nativo que más difiere de los otros suelos bajo BN, tanto en la forma global del patrón, como en las concentraciones generales de los constituyentes, que son comúnmente mucho menores, además, BN1 y BN2 tienen valores considerablemente más cercanos entre sí. En PL los perfiles muestran patrones más dispares los unos con los otros. Se ve una similitud entre los patrones de BN4 y PL1.

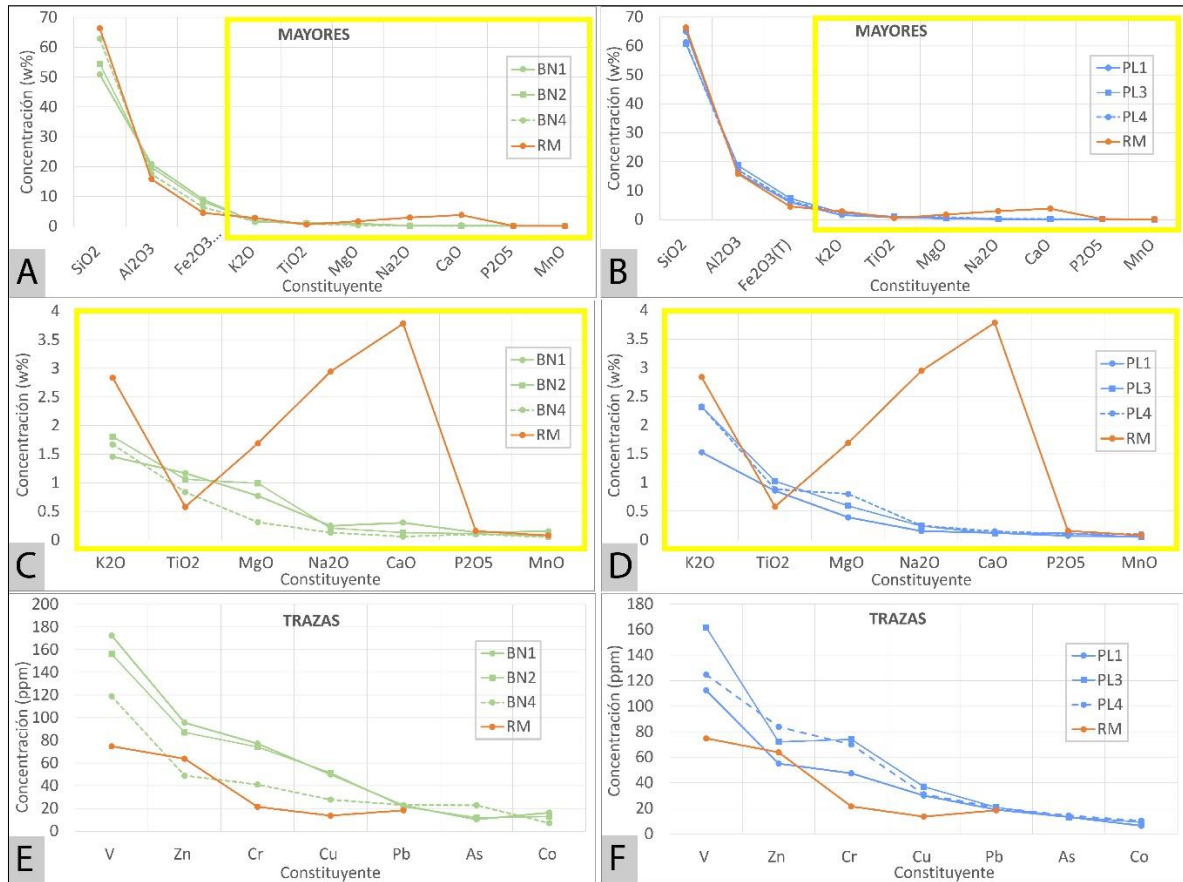


Figura 4.10: Patrones geoquímicos perfiles y roca madre (RM). A. Elementos mayores en sitios bajo bosque nativo; B. Para elementos mayores en sitios bajo plantación; C. Acercamiento de parte dentro del recuadro amarillo en A para bosque nativo. (D) Acercamiento de parte dentro del recuadro amarillo en B para plantación; D. Elementos traza en sitios bajo plantación; E. Elementos traza en sitios bajo bosque nativo; F. Elementos traza en sitios bajo plantación. (Elementos traza en roca madre no incluye valores para As y Co).

En función del uso de suelo, y de forma general, se observan patrones de composición elemental bastante similares (Figura 4.11), por lo tanto, las concentraciones promedio en ambas condiciones vegetacionales son semejantes. El patrón con diferencias más notorias corresponde al de la roca madre (línea naranja en las figuras).

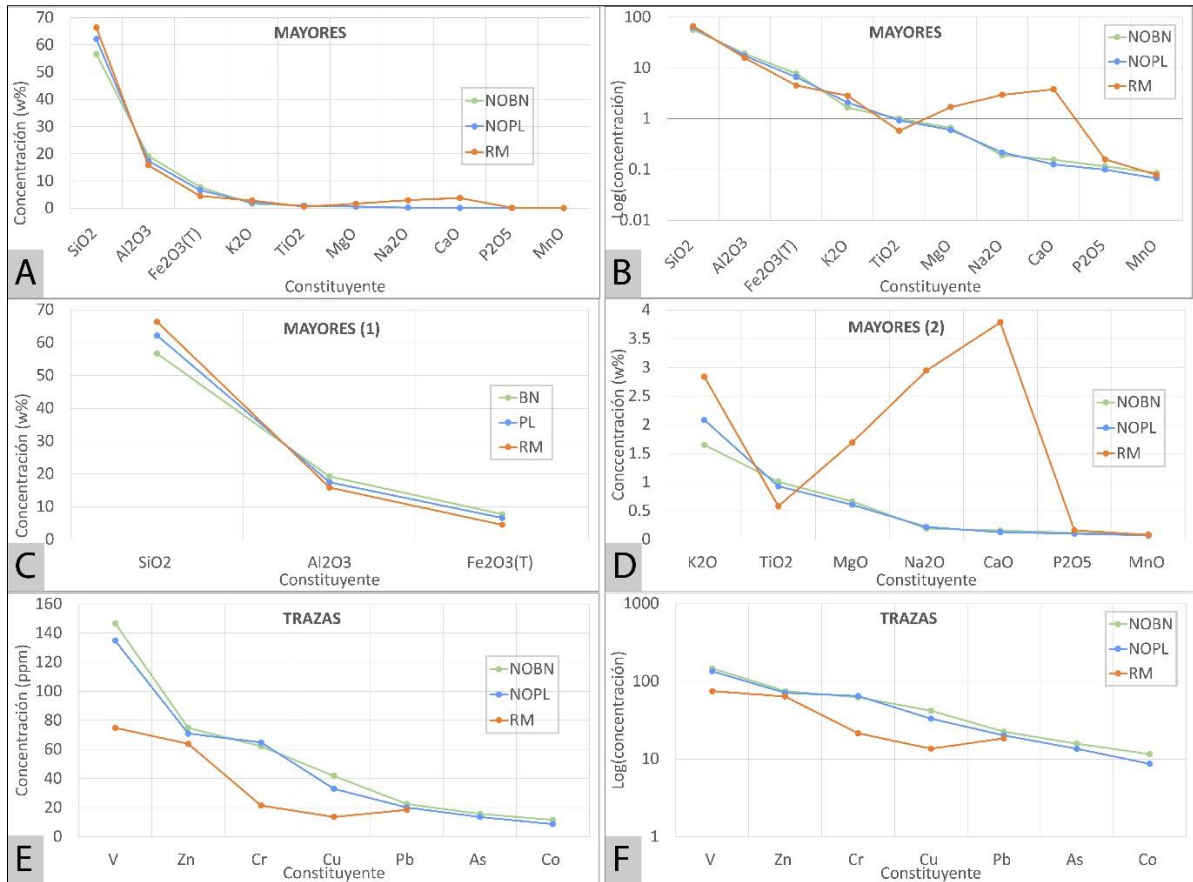


Figura 4.11: Patrones geoquímicos promedios para bosque nativo (BN), plantaciones forestales (PL) y roca madre (RM). A. Concentraciones para elementos mayores; B. Concentraciones de elementos mayores en escala logarítmica; C. Variaciones de los tres elementos mayoritarios Si, Al, Fe; D. Variaciones para elementos mayores de menor concentración: K, Ti, Mg, Na, Ca, P y Mn; E. concentraciones para elementos traza; F. Concentraciones de elementos traza en escala logarítmica (Elementos traza en roca madre no incluye valores para As y Co).

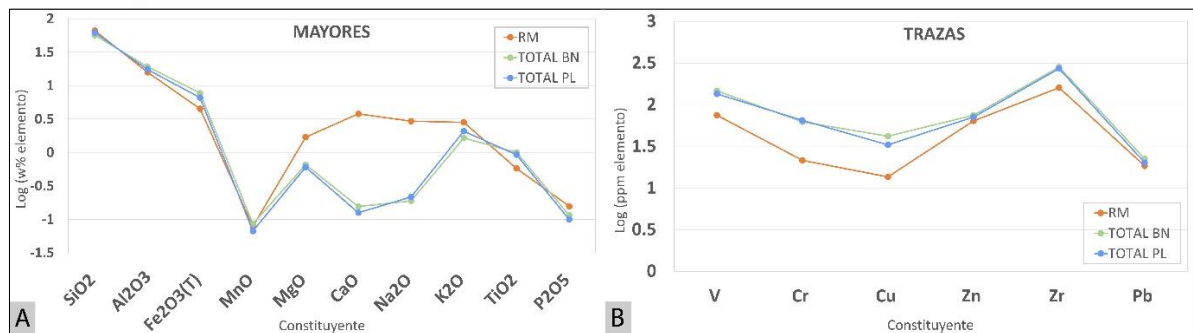


Figura 4.12: Patrones geoquímicos promedio bosque (BN), promedio plantaciones forestales (PL) y roca madre (RM) en escala logarítmica. A. Para elementos mayores; B. Para elementos traza.

De forma más específica, en la Figura 4.13.A, se puede notar que todos los sitios presentan menos concentración de SiO₂ que la RM, además, este elemento muestra valores más elevados en los

sitios bajo plantación (NOPL). Caso contrario sucede para Al_2O_3 y Fe_2O_3 que, a pesar de seguir un patrón similar, reflejan concentraciones mayores en los sitios que en la RM, y son mayores en NOBN. En Figura 4.13.B, se nota que en los sitios el K_2O , MgO , Na_2O , CaO y P_2O_5 , está menos concentrado que en la RM, no así el TiO_2 , para el que pasa lo contrario. Para MnO , los valores son más cercanos y la RM tiene un valor intermedio (comparando gráficamente). El K_2O tiene en general mayor concentración en plantaciones, exceptuando PL1 que muestra valores más cercanos a los de NOBN. El Na_2O al igual que el P_2O_5 y el MnO , tiene concentraciones bastante similares, tanto en los sitios como en la RM. El MgO , es el constituyente que presenta más variabilidad en estos valores. En el caso de los elementos traza (Figura 4.13.C) se registran en general mayores concentraciones en los sitios que en la RM, con solo dos excepciones puntuales (BN4 y PL1). De manera global, NOPL registra valores menores que NOBN, con excepción de BN4 que en el caso de algunos elementos presenta las menores concentraciones de todos los sitios (Zn, Cr, Cu, As). Pb, Co y As son los que menos varían entre los sitios y el que más lo hace es el V que no sigue una regla general distinguible (concentraciones en los sitios se intercalan en la gráfica).

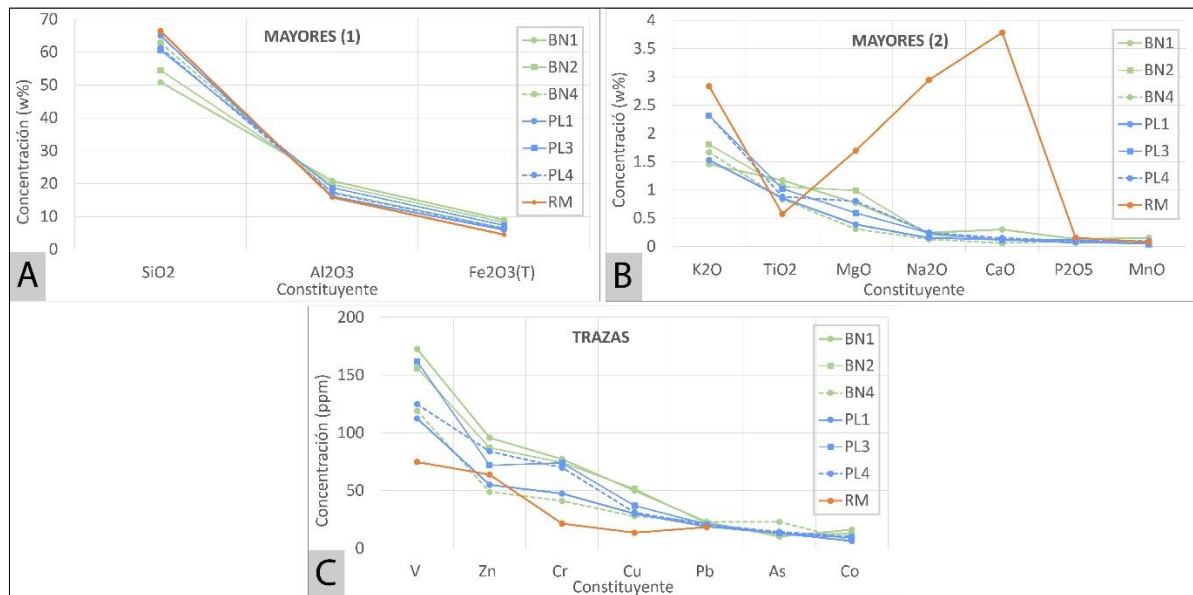


Figura 4.13: Patrones geoquímicos perfiles y roca madre (RM). (A) Mayores con más concentración para todos los sitios. (B) Mayores restantes para todos los sitios. (C) Trazas para todos los sitios.

4.2.3. Coeficientes de transferencia de masas

El cálculo del coeficiente de transferencia de masas normaliza la concentración de un constituyente del suelo, con la concentración de un elemento inmóvil como Zr o Ti. Las concentraciones de dichos elementos índices dan un punto de referencia para estimar ganancias y pérdidas reales de los elementos móviles que forman parte del suelo estudiado con respecto de su roca madre, en el presente estudio se utilizó el Ti.

A partir de los resultados (Tabla 4.9) es posible discernir si el horizonte ha experimentado ganancia o pérdida de alguno de sus constituyentes. Si τ_{ij} es positivo, hay ganancia o enriquecimiento y si τ_{ij} es negativo, se infiere pérdida o empobrecimiento; cuando $\tau_{ij} = 0$, o muy cercano, la concentración del constituyente en el suelo es idéntica a la del material parental, por tanto, es considerado inmóvil; cuando $\tau_{ij} = -1$, se ha perdido la totalidad del elemento. Se elaboran diagramas multielemento (Figura 4.14 y 4.15) con los τ_{ij} de cada componente, para comparar estas ganancias y/o pérdidas dentro de los suelos en cada perfil. Adicionalmente se construyen diagramas τ_{ij} versus profundidad (Figuras 4.16 y 4.17), para establecer los cambios por horizonte de suelo que experimenta cada elemento dentro de un mismo perfil y hacer las comparaciones pertinentes.

Tabla 4.9: Resultados cálculo τ_{ij} . En amarillo se destacan los valores positivos (ganancia), en celeste los valores menores a ± 0.03 , considerados muy cercanos a 0 (inmóvil), y en naranja los muy cercanos a -1 (menores o iguales a -0.95; pérdida total del elemento).

		Tij														
Analizado	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ (T)	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	V	Cr	Cu	Zn	Zr	Pb	
Muestras Nativo	BN1-1	-0.53	-0.37	-0.02	0.60	-0.71	-0.89	-0.94	-0.65	-0.33	0.12	1.03	0.83	-0.03	-0.16	-0.23
	BN1-2	-0.56	-0.36	-0.04	0.37	-0.73	-0.96	-0.95	-0.67	-0.59	0.09	0.99	0.57	-0.25	-0.07	-0.51
	BN1-3	-0.60	-0.39	-0.04	-0.01	-0.75	-0.97	-0.96	-0.70	-0.59	0.10	0.83	0.44	-0.23	-0.18	-0.34
	BN1-4	-0.63	-0.37	-0.03	0.09	-0.76	-0.97	-0.96	-0.75	-0.64	0.15	0.74	0.72	-0.27	-0.24	-0.42
	BN1-5	-0.49	-0.21	0.07	-0.62	-0.67	-0.99	-0.97	-0.57	-0.54	0.16	0.96	1.21	-0.15	0.05	-0.22
	BN1-6	-0.66	-0.34	-0.01	-0.39	-0.81	-0.97	-0.96	-0.79	-0.59	0.17	0.70	1.02	-0.28	-0.27	-0.43
	BN1-7	-0.67	-0.30	0.03	-0.62	-0.85	-0.98	-0.97	-0.81	-0.65	0.15	0.50	1.04	-0.35	-0.27	-0.32
	BN2-1	-0.61	-0.43	-0.10	-0.15	-0.71	-0.94	-0.94	-0.70	-0.62	0.12	0.76	0.58	-0.41	-0.32	-0.71
	BN2-2	-0.63	-0.41	-0.07	-0.56	-0.75	-0.98	-0.95	-0.73	-0.70	0.15	0.74	1.06	-0.42	-0.21	-0.52
	BN2-3	-0.63	-0.35	-0.01	-0.61	-0.75	-0.99	-0.96	-0.72	-0.70	0.19	0.76	1.09	-0.33	-0.14	-0.44
	BN2-4	-0.57	-0.25	0.10	-0.64	-0.71	-0.99	-0.96	-0.64	-0.62	0.23	1.02	1.79	-0.15	-0.14	-0.15
	BN2-5	-0.49	-0.21	0.07	-0.62	-0.67	-0.99	-0.97	-0.57	-0.54	0.16	0.96	1.21	-0.15	0.05	-0.22
	BN2-6	-0.45	-0.23	0.02	-0.62	-0.61	-0.99	-0.97	-0.56	-0.48	0.08	1.05	0.85	-0.21	0.34	-0.25
	BN2-7	-0.45	-0.31	-0.03	-0.60	-0.52	-0.99	-0.98	-0.60	-0.57	0.01	0.99	0.80	-0.04	0.47	-0.17
	BN4-1	-0.49	-0.39	-0.12	-0.40	-0.89	-0.97	-0.97	-0.76	-0.62	0.08	0.39	0.75	-0.63	0.02	-0.68
	BN4-2	-0.50	-0.39	-0.12	-0.57	-0.89	-0.98	-0.97	-0.76	-0.68	0.08	0.29	0.23	-0.65	0.07	-0.58
	BN4-3	-0.48	-0.36	-0.11	-0.68	-0.91	-0.99	-0.98	-0.74	-0.71	0.07	0.31	0.24	-0.56	0.12	-0.42
	BN4-4	-0.41	-0.30	-0.07	-0.71	-0.91	-0.99	-0.97	-0.69	-0.64	0.10	0.46	0.38	-0.51	0.20	-0.19
	BN4-5	-0.23	-0.13	0.03	-0.76	-0.90	-0.99	-0.97	-0.54	-0.50	0.07	0.09	0.15	-0.51	0.51	0.10
	BN4-6	-0.10	-0.08	0.03	-0.74	-0.85	-1.00	-0.97	-0.44	-0.50	0.01	0.23	0.29	-0.31	0.80	0.33
BN4-7	-0.26	-0.23	0.03	-0.73	-0.85	-1.00	-0.97	-0.56	-0.43	0.04	0.04	0.09	-0.42	0.68	0.25	
BN4-8	-0.05	0.07	0.15	-0.49	-0.81	-0.99	-0.97	-0.28	-0.33	0.19	0.33	1.11	-0.25	0.57	0.40	
BN4-9	-0.33	-0.07	0.11	-0.12	-0.80	-1.00	-0.95	-0.31	-0.34	0.26	0.72	0.63	-0.19	0.03	0.12	
Muestras Plantación	PL1-1	-0.41	-0.52	-0.26	-0.12	-0.86	-0.96	-0.96	-0.73	-0.64	-0.08	0.45	0.37	-0.42	0.18	-0.39
	PL1-2	-0.42	-0.48	-0.23	-0.29	-0.86	-0.97	-0.96	-0.73	-0.74	-0.06	0.37	-0.13	-0.54	0.21	-0.68
	PL1-3	-0.43	-0.45	-0.20	-0.39	-0.85	-0.97	-0.96	-0.73	-0.78	-0.03	0.36	0.29	-0.36	0.11	-0.43
	PL1-4	-0.41	-0.42	-0.18	-0.55	-0.85	-0.98	-0.97	-0.68	-0.77	0.00	0.66	0.31	-0.44	0.22	-0.45
	PL1-5	-0.22	-0.03	0.06	-0.65	-0.80	-0.99	-0.96	-0.32	-0.74	0.15	0.91	1.41	-0.36	0.20	-0.29
	PL1-6	-0.04	0.10	0.18	-0.71	-0.82	-0.99	-0.96	-0.40	-0.51	0.20	0.78	2.52	-0.40	0.27	-0.07
	PL1-7	-0.34	-0.21	0.01	-0.71	-0.86	-0.99	-0.98	-0.69	-0.70	0.02	0.26	0.00	-0.47	0.49	-0.01
	PL1-8	-0.29	-0.24	-0.03	-0.70	-0.82	-0.99	-0.98	-0.64	-0.64	0.01	0.32	0.04	-0.34	0.60	0.03
	PL3-1	-0.47	-0.46	-0.20	-0.40	-0.81	-0.96	-0.95	-0.70	-0.64	0.02	0.58	0.25	-0.29	-0.08	-0.63
	PL3-2	-0.52	-0.46	-0.18	-0.46	-0.81	-0.97	-0.95	-0.71	-0.63	0.08	0.48	0.56	-0.34	-0.13	-0.57
	PL3-3	-0.53	-0.42	-0.19	-0.60	-0.79	-0.98	-0.96	-0.65	-0.64	0.11	0.65	0.49	-0.36	-0.08	-0.53
	PL3-4	-0.48	-0.28	-0.08	-0.66	-0.75	-0.99	-0.96	-0.52	-0.60	0.26	1.12	0.68	-0.11	-0.05	-0.29
	PL3-5	-0.50	-0.33	-0.08	-0.72	-0.76	-0.99	-0.96	-0.56	-0.61	0.22	1.07	0.63	-0.22	-0.05	-0.37
	PL3-6	-0.44	-0.28	-0.10	-0.78	-0.79	-0.99	-0.96	-0.47	-0.58	0.24	0.96	0.77	-0.34	-0.02	-0.35
	PL3-7	-0.41	-0.24	-0.09	-0.82	-0.81	-0.99	-0.96	-0.43	-0.52	0.23	1.04	0.84	-0.41	-0.03	-0.29
	PL3-8	-0.44	-0.23	-0.05	-0.84	-0.82	-0.99	-0.95	-0.36	-0.50	0.35	1.26	0.34	-0.52	-0.02	-0.28
	PL3-9	-0.51	-0.29	0.05	-0.84	-0.86	-0.99	-0.96	-0.46	-0.47	0.36	1.05	0.22	-0.57	-0.04	-0.25
	PL3-10	-0.51	-0.29	0.09	-0.78	-0.82	-0.99	-0.96	-0.48	-0.51	0.36	1.33	0.63	-0.48	-0.09	-0.07
	PL4-1	-0.46	-0.45	-0.21	0.31	-0.77	-0.93	-0.94	-0.60	-0.49	0.02	0.88	-0.01	-0.84	-0.03	-0.91
	PL4-2	-0.47	-0.43	-0.19	-0.13	-0.79	-0.97	-0.95	-0.62	-0.60	0.00	0.58	0.25	-0.38	0.08	-0.63
PL4-3	-0.46	-0.39	-0.14	0.06	-0.76	-0.97	-0.94	-0.61	-0.56	0.03	0.90	0.29	-0.18	-0.10	-0.40	
PL4-4	-0.39	-0.31	-0.06	-0.23	-0.70	-0.98	-0.95	-0.53	-0.63	0.10	1.12	0.92	-0.18	0.13	-0.29	
PL4-5	-0.45	-0.28	-0.02	-0.30	-0.58	-0.98	-0.95	-0.43	-0.62	0.19	1.50	0.75	0.03	0.05	-0.16	
PL4-6	-0.27	-0.18	0.06	-0.30	-0.58	-0.98	-0.95	-0.35	-0.52	0.14	1.48	0.68	0.07	0.14	-0.01	
PL4-7	-0.21	-0.12	0.02	-0.33	-0.65	-0.99	-0.94	-0.29	-0.54	0.15	1.26	0.78	0.14	0.15	0.05	
PL4-8	-0.32	-0.14	-0.01	-0.33	-0.66	-0.99	-0.94	-0.28	-0.54	0.14	1.36	0.59	0.13	-0.05	0.10	
PL4-9	-0.44	-0.20	-0.02	-0.24	-0.67	-0.99	-0.95	-0.37	-0.60	0.11	1.32	0.37	0.07	-0.15	-0.02	

4.2.3.1. Diagramas multielemento τ_{ij} por perfil

Para los elementos mayores en sitios bajo bosque nativo (BN), se observa en la figura 4.14 (A, C y E) que los horizontes más superficiales (tonos azules/fríos) registran en su mayoría pérdidas, con solo un par de excepciones en horizontes específicos, BN1-1, BN1-2 y BN1-4 donde hay ganancias en Mn, y BN2-4 que presenta ganancias en Fe. Las mayores pérdidas en estos primeros 4 horizontes ocurren para Mg, Ca, Na y K. Para los horizontes inferiores (en tonos anaranjados/cálidos), se nota la misma tendencia al empobrecimiento, con excepciones puntuales, BN1-5, BN2-5, BN4-8 y

BN4-9, donde el Fe se encuentra enriquecido. El mayor empobrecimiento en estos horizontes más profundos se da para Mg, Ca y Na. En BN1 en general las pérdidas son mayores en los horizontes más profundos, en BN2 Si, Al, Fe, Mg, K y P están más empobrecidos en la superficie, finalmente, en BN4 los elementos mayores se encuentran menos empobrecidos en profundidad (de manera general).

Para los elementos mayores en sitios bajo plantaciones forestales (PL), en la figura 4.13 B, D y F se muestra que en los horizontes más superficiales (tonos azules/fríos) se registran principalmente pérdidas, con solo 2 excepciones, PL4-1 y PL4-3, donde hay ganancias en Mn. El mayor empobrecimiento en la totalidad de los horizontes PL lo registran Mg, Ca y Na. A mayor profundidad (tonos anaranjados/cálidos) igualmente existen predominantemente pérdidas, con excepciones específicas, PL1-5 con ganancias en Fe, PL1-6 con ganancias en Fe y Al, PL3-9, PL3-10, PL4-6 y PL4-7 con ganancias en Fe. Los 3 perfiles PL registran menor empobrecimiento de Si, Al, Fe, Mg, K y P a medida que se descende en perfil (tonos cálidos), por otro lado, el Mn se encuentra menos empobrecido en superficie (tonos fríos), registrando incluso ganancias (PL4-1 y PL4-3). Los otros elementos mayores no registran diferencias tan significativas.

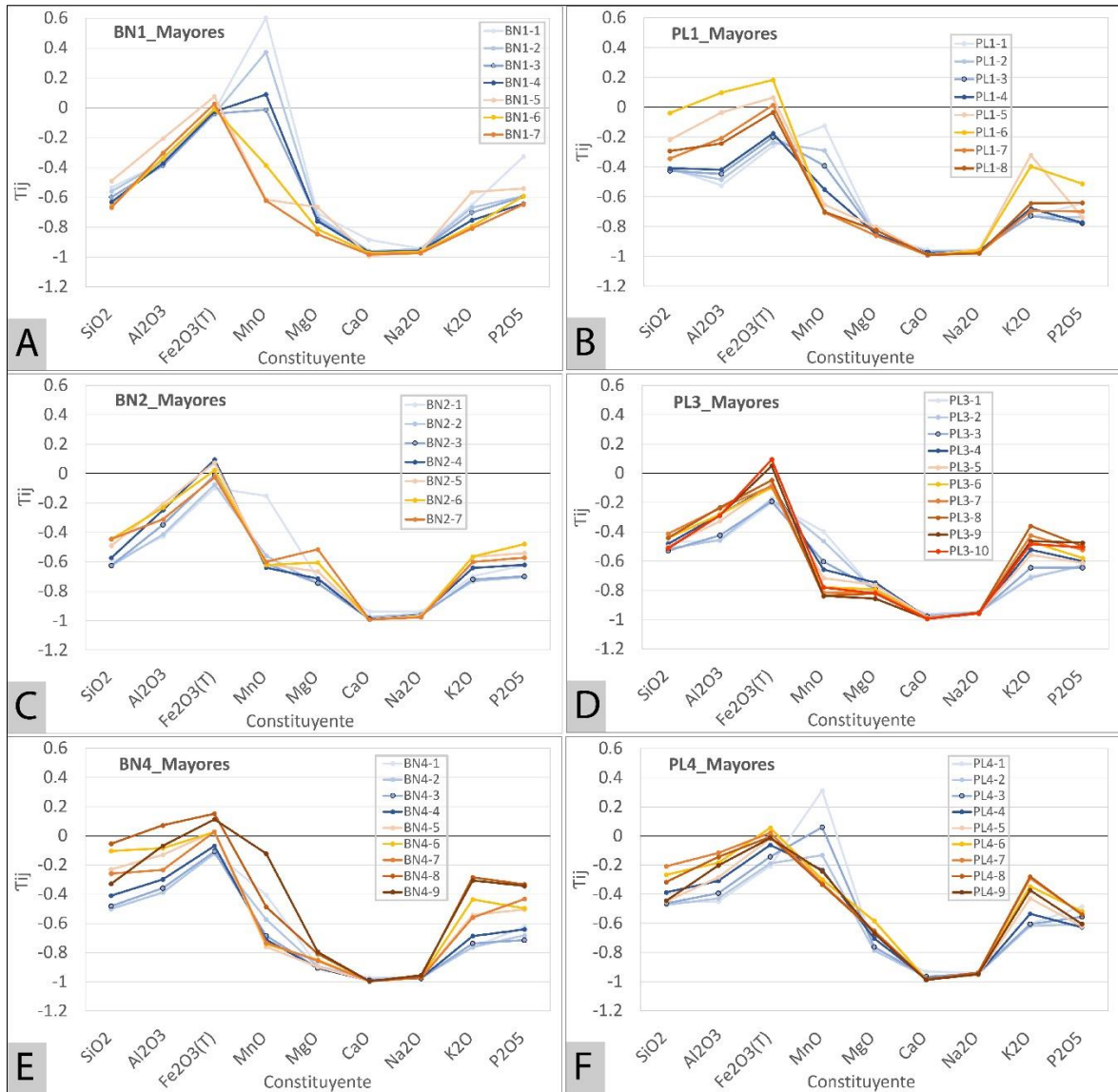


Figura 4.14: Diagramas multielemento τ_{ij} para elementos mayoritarios por perfil. Los colores azulados representan los horizontes más superficiales del perfil, con el más claro como el más superficial y el más oscuro como más profundo (dentro de los superficiales; aproximadamente a la mitad del perfil). Los colores amarillos, rojos y marrones representan los horizontes más profundos del perfil, mientras más oscuro el tono se representa un nivel más profundo.

En el caso de los elementos traza (Figura 4.15.A, C y E) bajo bosque nativo (BN), para primeros 4 horizontes (tonos azules/fríos), los τ_{ij} son más variados, por una parte, se muestra que en todos hay ganancias de V, Cr y Cu, y por el otro, se registran pérdidas en Zn, Zr y Pb, exceptuando en BN4-1, BN4-2, BN4-3 y BN4-4, donde hay enriquecimiento de Zr. Para los horizontes inferiores (tonos anaranjados/cálidos) ocurre exactamente lo mismo, pero en BN4 el Zr se encuentra enriquecido en todos los horizontes, y, además, en BN4-5, BN4-6, BN4-7, BN4-8 y BN4-9 hay ganancias en Pb. En general en los BN se nota una tendencia al menor empobrecimiento de elementos traza en profundidad.

Para los elementos traza bajo plantaciones forestales (Figura 4.15.B, D y F), en los horizontes más superficiales (tonos azules), se registran ganancias en los mismos 3 elementos que para BN, V, Cr y Cu, solo PL3 general y PL4-1 y PL4-3 no presentan ganancias en Zr. En los horizontes más profundos (tonos anaranjados/cálidos) sucede lo mismo, y además en PL4-5, PL4-6, PL4-7 y PL4-8, se registran ganancias en Zn. La tendencia al menor empobrecimiento (o mayor enriquecimiento) de estos constituyentes en profundidad se repite para este uso de suelo.

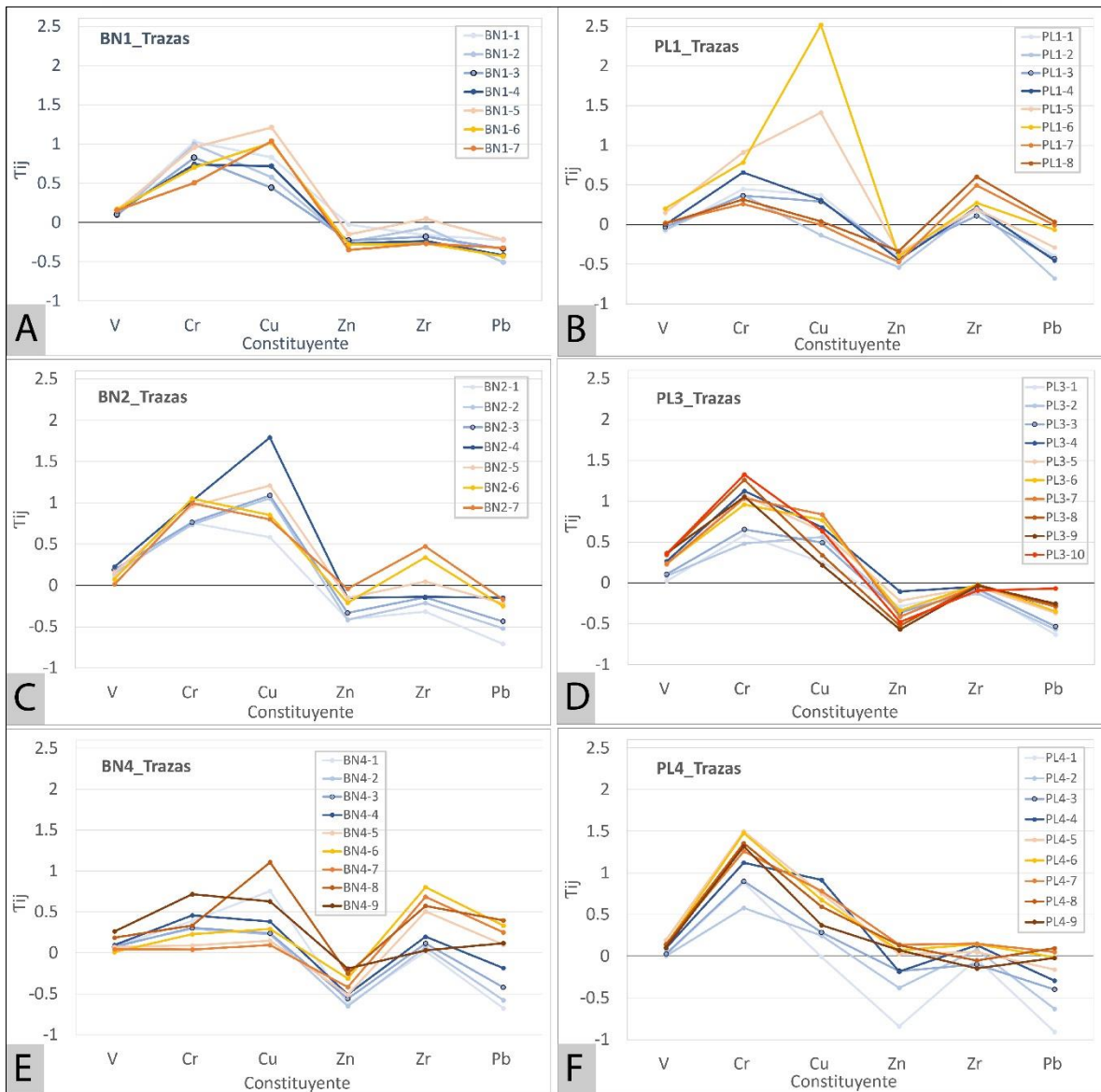


Figura 4.15: Diagramas multielemento τ_{ij} para elementos traza por perfil. Los colores azulados representan los horizontes más superficiales del perfil, con el más claro como el más superficial y el más oscuro como más profundo (dentro de los superficiales; aproximadamente a la mitad del perfil). Los colores amarillos, rojos y marrones representan los horizontes más profundos del perfil, mientras más oscuro el tono se representa un nivel más profundo.

Tabla 4.10: Resumen datos τ_{ij} general para cada perfil bajo bosque nativo.

	BN1	BN2	BN4
SiO₂	Pérdida	Pérdida	Pérdida
Al₂O₃	Pérdida	Pérdida	Pérdida excepto en el horizonte BN4-8
Fe₂O₃(T)	Pérdida (muy poca, casi inmóvil), excepto en BN1-5 y BN1-7 (ganancia mínima, casi inmóvil)	Pérdida en los horizontes BN2-1, BN2-2, BN2-3 y BN2-7, ganancia en BN2-4, BN2-5 y BN2-6 (en BN2-3 es casi 0)	Ganancia en BN4-8, BN4-9, BN4-7, BN4-6, BN4-5 (BN4-7, BN4-6, BN4-5 casi iguales), pérdida en BN4-4, BN4-3, BN4-2, BN4-1.
MnO	Ganancia en BN1-1, BN1-2 y BN1-4 (BN1-1 bastante mayor a los demás), pérdida en BN1-3, BN1-5, BN1-6 y BN1-7 (en BN1-3 muy cercano a cero 0)	Pérdida (en BN2-1 es mucho menor la pérdida que en el resto de los horizontes)	Pérdida
MgO	Pérdida	Pérdida	Pérdida
CaO	Pérdida	Pérdida	Pérdida
Na₂O	Pérdida	Pérdida	Pérdida
K₂O	Pérdida	Pérdida	Pérdida
P₂O₅	Pérdida	Pérdida	Pérdida
V	Ganancia	Ganancia	Ganancia
Cr	Ganancia	Ganancia	Ganancia
Cu	Ganancia	Ganancia, mucho mayor en horizonte BN2-4	Ganancia
Zn	Pérdida	Pérdida	Pérdida
Zr	Pérdida, excepto en BN1-5 que presenta una leve ganancia	Pérdida en BN2-4, BN2-3, BN2-2 y BN2-1; Ganancia en BN2-7, BN2-6 y BN2-5.	Ganancia, pero en BN4-1 y BN4-9 casi inmóvil
Pb	Pérdida	Pérdida	Ganancia en BN4-5, BN4-6, BN4-7, BN4-8 y pérdida en BN4-1, BN4-2, BN4-3, BN4-4

Tabla 4.11: Resumen datos τ_{ij} general para cada perfil bajo plantación.

	PL1	PL3	PL4
SiO₂	Pérdida	Pérdida	Pérdida
Al₂O₃	Pérdida excepto en horizonte PL1-6	Pérdida	Pérdida
Fe₂O₃(T)	Ganancia en PL1-5, PL1-6, PL1-7 y pérdida en los demás (PL1-7 cercano a cero)	Pérdida, excepto en PL3-9 y PL3-10 (últimos)	Pérdida, excepto PL4-6 y PL4-7
MnO	Pérdida	Pérdida	Pérdida, excepto PL4-3 y PL4-1
MgO	Pérdida	Pérdida	Pérdida
CaO	Pérdida	Pérdida	Pérdida
Na₂O	Pérdida	Pérdida	Pérdida
K₂O	Pérdida	Pérdida	Pérdida
P₂O₅	Pérdida	Pérdida	Pérdida
V	Pérdida en los primeros cuatro horizontes, y ganancia en los restantes	Ganancia	Ganancia
Cr	Ganancia	Ganancia	Ganancia
Cu	Ganancia, excepto en PL1-2 y PL1-7	Ganancia	Ganancia, excepto leve pérdida (casi 0) en PL4-1
Zn	Pérdida	Pérdida	Pérdida en los primeros cuatro horizontes y ganancia en los siguientes
Zr	Ganancia	Pérdida	Ganancia en PL4-2, PL4-4, PL4-5, PL4-6, PL4-7 y pérdida en los demás horizontes
Pb	Pérdida, excepto en PL1-7 y PL1-8 (PL1-7 prácticamente 0)	Pérdida	Pérdida, excepto PL4-7 y PL4-8

4.2.3.2. Perfiles comparativos de los τ_{ij} por elemento

Todos los valores de τ_{ij} para el SiO₂ (Figura 4.16.A) son negativos, por lo tanto, se registran pérdidas de éste en todos los horizontes de los perfiles, tanto bajo bosque nativo (BN), como bajo plantación (PL). En el caso de los BN el empobrecimiento es menor en los niveles inferiores del perfil, excepto en BN1 en que la pérdida aumenta con la profundidad, menos en BN1-5 que disminuye, esto último ocurre también en BN4, donde aproximadamente a la misma profundidad (~90 cm) hay menos empobrecimiento de este elemento. Por su parte, en los PL, el empobrecimiento es más o menos similar en la parte superior y en el horizonte más profundo, se notan variaciones más o menos constantes y menores en la vertical, con excepción de entre los 90 y 120 cm aproximadamente, donde el empobrecimiento disminuye notablemente con respecto de los demás horizontes.

En el caso del Al₂O₃ (Figura 4.16.B), τ_{ij} toma valores negativos en casi todos los horizontes de los perfiles, con solo dos excepciones, BN4-8 y PL1-6 en donde hay ganancias. En la totalidad de los perfiles se observa una leve disminución del empobrecimiento en los primeros 50 cm aproximadamente, donde la diferencia comienza a ser más grande. Ya cercano a los 100 cm comienza nuevamente a haber más empobrecimiento. En general la pérdida de este elemento es mayor en los sitios bajo plantación, al menos en los horizontes más superficiales.

El Fe_2O_3 (Figura 4.16.C) muestra pérdidas en los horizontes superficiales de todos los perfiles, sin embargo, las pérdidas van disminuyendo a medida que se baja en el perfil, hasta más o menos el centro o mitad inferior, donde los horizontes BN1-5, BN1-7, BN2-4 a BN2-6, BN4-5, a BN4-10, PL1-5 a PL1-7, PL3-9, PL3-10 y PL4-6 presentan enriquecimiento en este elemento. Solo BN2, PL1 y PL4 muestran empobrecimiento en su horizonte más profundo (aunque menor que el de los horizontes superiores). Los τ_{ij} del Fe_2O_3 son menores en los PL (en los horizontes superficiales).

Para el MnO (Figura 4.16.D) se observan pérdidas en la mayoría de los perfiles, excepto en los horizontes PL4-1 y PL4-3, y BN1-1 y BN1-2. Se ve en general una tendencia al aumento del empobrecimiento hacia profundidad, solo en BN4 disminuye en los últimos dos horizontes (BN4-8 y BN4-9). En BN1-3 MnO es prácticamente inmóvil.

Los τ_{ij} del MgO (Figura 4.16.E) son todos negativos (pérdida), y fluctúan entre los -0.9 y los -0.5 aproximadamente. En general las variaciones entre horizontes dentro de un mismo perfil no son tan grandes, sobre todo en BN4 y PL1. En BN2 y BN3 la pérdida es menor en los horizontes más profundos, en cambio en BN1 ocurre lo contrario. Los perfiles de PL muestran un patrón bastante similar en que el empobrecimiento (casi idéntico a lo largo del perfil), con excepción de la parte central, aproximadamente entre los 50 y 70 cm (PL1-5, PL3-4 y PL3-5, PL4-5 y PL4-6) en que se ve un empobrecimiento menor.

En el caso del CaO (Figura 4.16.F), una vez más se observa empobrecimiento en todos los perfiles, tiene valores más empobrecidos que los demás elementos, con valores de τ_{ij} entre -0.89 y -0.99. Los patrones son bastante similares entre sí, tanto en BN como en PL, con un empobrecimiento más marcado en los primeros 20-30 cm y un valor de τ_{ij} más constante en los horizontes inferiores. El único perfil que difiere un poco de los demás es BN1, que muestra una notable diferencia entre su horizonte más superficial, en el que la pérdida de CaO es significativamente menor que en los horizontes siguientes, además, las diferencias entre horizontes en general son más notorias que en los demás perfiles.

Para el Na_2O (Figura 4.16G), los valores de τ_{ij} fluctúan entre los -0.94 y los -0.98, junto con el CaO es de los elementos que registran más pérdida con respecto a los otros elementos. Los sitios bajo plantación muestran menor pérdida en los niveles superiores, la que va aumentando conforme profundizamos en el perfil. En PL1-5, PL3-8 y PL4-7 y PL4-8 hay una disminución en el empobrecimiento, pero en los horizontes siguientes vuelve a aumentar. BN1 y BN2 presentan un aumento del empobrecimiento con la profundidad, en cambio en BN4 sucede el caso contrario, y luego de aumentar en los primeros tres horizontes, comienza a disminuir en los subyacentes.

Para el K_2O (Figura 4.16H) se registra empobrecimiento en todos los perfiles. BN2 y BN4 tienen mayor empobrecimiento en la parte superficial y menor en profundidad, no ocurre lo mismo con BN1, en que el empobrecimiento es mayor en los últimos dos horizontes. En los tres sitios de BN se observa una disminución del empobrecimiento aproximadamente a los 90 cm (BN1-5, BN2-5, BN4-6). En el caso de los PL, se observa también una tendencia de menor empobrecimiento con la profundidad y un nivel intermedio en el que la diferencia es aún más marcada (PL1-5, PL1-6, PL3-4 a PL3-8 y PL4-5 a PL4-8).

La totalidad de los perfiles presenta empobrecimiento en P_2O_5 (Figura 4.16I). Los patrones de BN2 y BN4 son bastante similares, presentando una tendencia inicial con un progresivo empobrecimiento desde los horizontes superiores a los subyacentes, con una posterior disminución del empobrecimiento desde aproximadamente los 40 cm; BN1 nuevamente difiere un poco de sus pares, y muestra mayor empobrecimiento constante a medida que aumenta la profundidad, con solo excepción de BN1-5 que presenta una leve disminución con respecto de su horizonte suprayacente. PL1 sigue un patrón de aumento del empobrecimiento con la profundidad, con excepción de PL1-6 en que este disminuye, PL3 y PL4 tienen cambios menos significativos dentro del perfil.

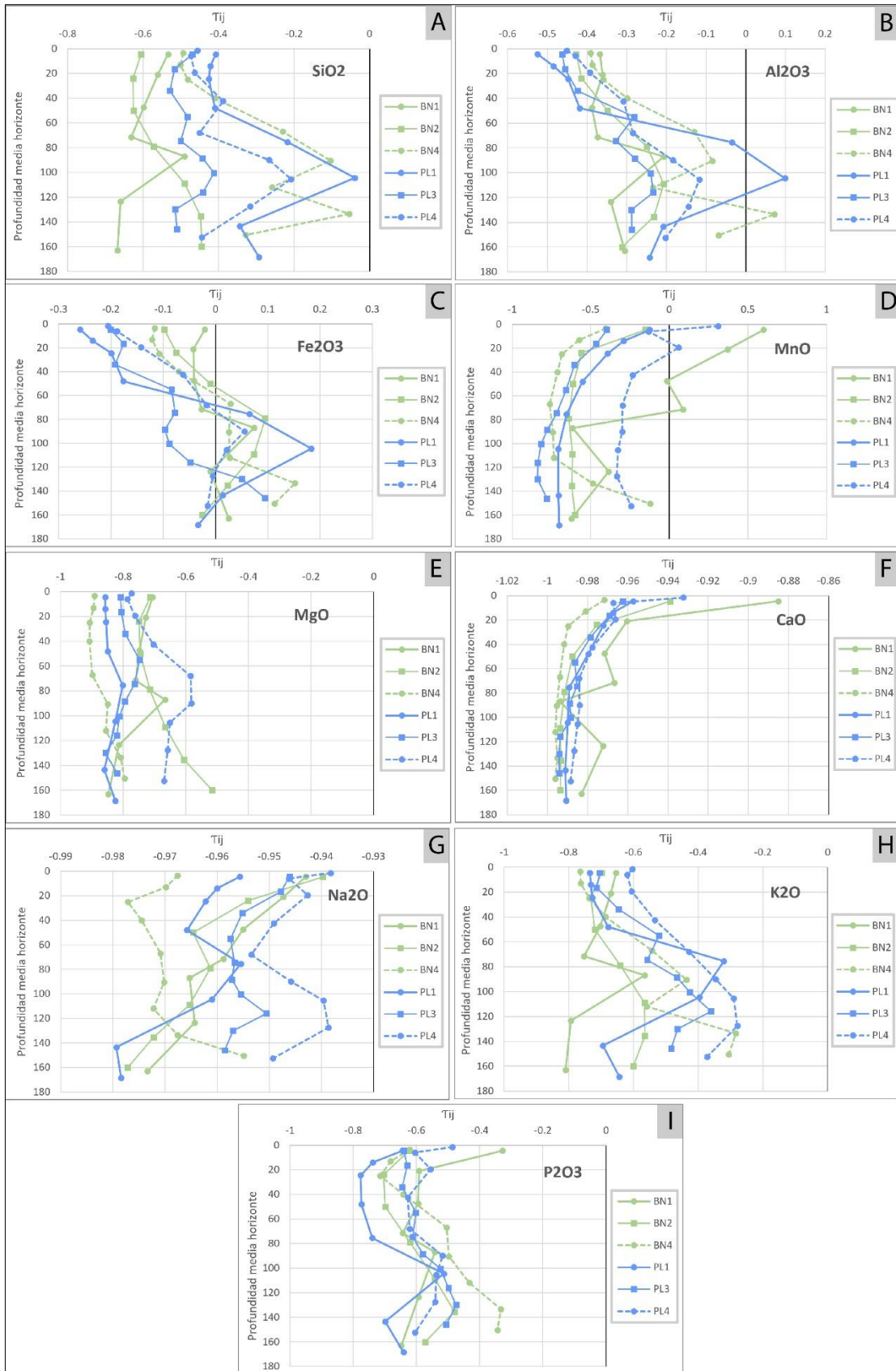


Figura 4.16: Diagramas τ_{ij} v/s profundidad por elemento, para elementos mayoritarios.

El V registra casi en su totalidad valores de τ_{ij} positivos (ganancia; Figura 4.17A), solo hay pérdidas en los primeros horizontes de PL1 (aproximadamente hasta los 50 cm de profundidad). Las ganancias toman valores mayores en profundidad, excepto en BN4 que desde aproximadamente los 40 cm de profundidad se nota una disminución en el τ_{ij} hasta más o menos los 125 cm, donde luego aumenta nuevamente. PL y BN siguen la misma tendencia de menor enriquecimiento en superficie y mayor a medida que profundizamos en el perfil.

En el caso del Cr (Figura 4.17B), solo se registran ganancias, tanto en PL como en BN. En general las ganancias aumentan con la profundidad, a excepción de BN1 que sigue tendencia contraria a los demás perfiles, BN4 que tiene una disminución en las ganancias desde los 50 cm a los 130 cm de profundidad aproximadamente, y PL1 que registra τ_{ij} menores en sus últimos dos horizontes. En PL hay una notoria acumulación a la profundidad media de más o menos 80 cm de profundidad, en cambio en BN las variaciones son más cercanas y no se distingue algún horizonte de acumulación de este elemento.

El Cu es otro de los elementos que muestra en su mayoría ganancias (Figura 4.17C), con excepción de un solo horizonte (PL1-2). De manera común, todos los perfiles muestran la tendencia de más ganancias en profundidad, pero en PL1 se observa una diferencia más grande, en específico en el horizonte PL1-6, que tiene una ganancia mucho más significativa, para luego en los últimos dos horizontes siguientes, disminuir casi a cero (igual a roca madre).

Por su parte el Zn mayormente registra pérdidas (Figura 4.17D), a excepción de PL4 que registra ganancias en los últimos cinco horizontes, más o menos desde los 60 cm de profundidad en adelante. BN2 y BN4 tienen tendencia principal a la disminución de las pérdidas en profundidad, en cambio en BN1 ocurre lo contrario. PL no muestra una tendencia definida, con PL1 relativamente parejo entre perfiles, PL3 con aumentos y disminuciones intercaladas, y PL4 con una disminución considerablemente grande de las pérdidas (hasta ganancias) hacia profundidad.

Finalmente, el Pb (Figura 4.17E) muestra una tendencia general de disminución del empobrecimiento a medida que se desciende en el perfil, llegando a registrar ganancias en BN4 y PL4, todos perfiles con patrón similar globalmente, solo que las diferencias entre el máximo empobrecimiento (-0.68) y máxima ganancia (0.40) son más notorias en BN4.

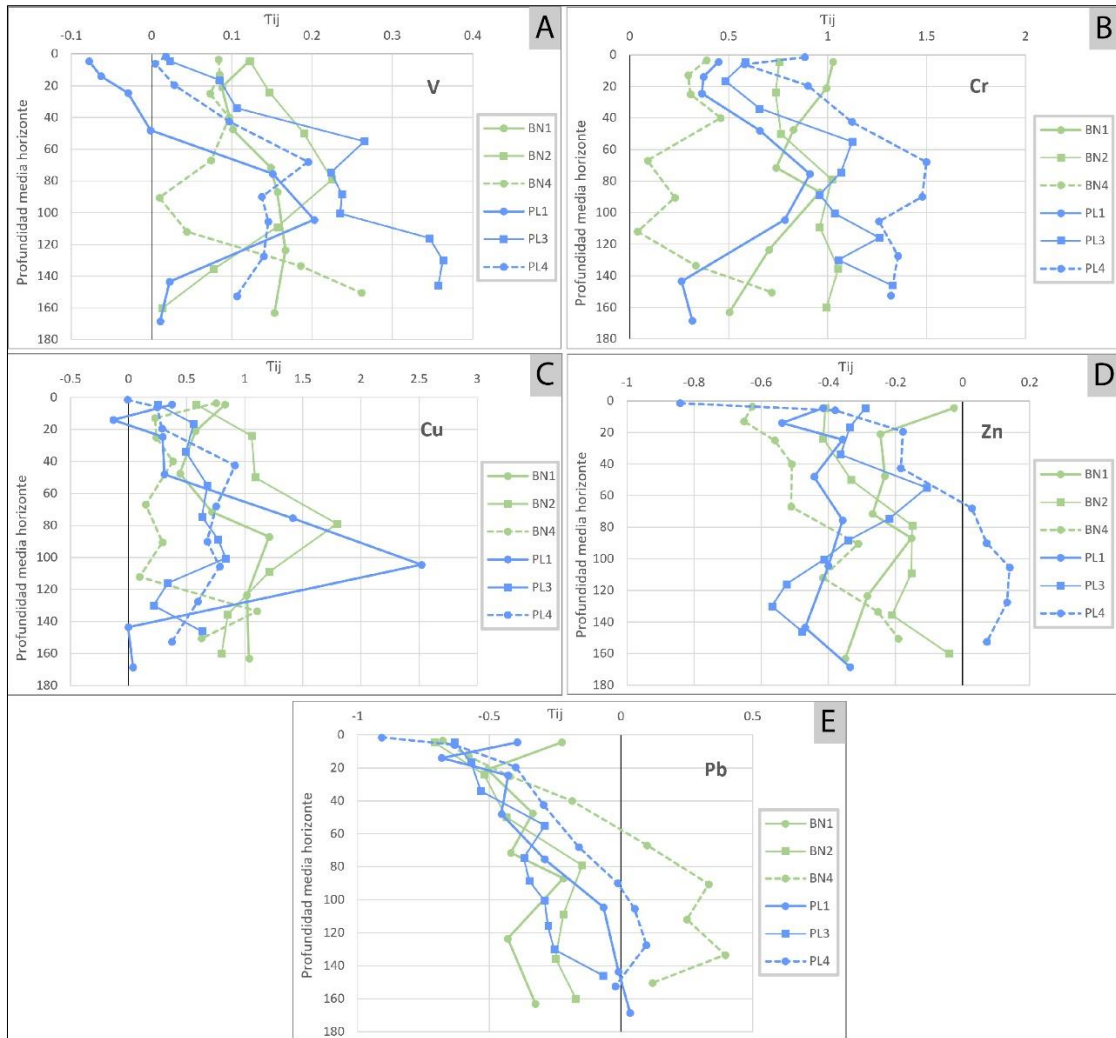


Figura 4.17: Diagramas τ_{ij} v/s profundidad por elemento, para elementos traza.

4.2.3.3. Perfiles de suelo de enriquecimiento y empobrecimiento

Estos perfiles permiten interpretar de forma más sencilla el comportamiento de un elemento a lo largo de un perfil de suelo. Al igual que los diagramas anteriores muestran τ_{ij} v/s profundidad, pero esta vez de forma separada para cada sitio. Los gráficos son realizados individualmente para cada elemento (Anexo B13), y de forma conjunta para aquellos constituyentes con comportamientos similares.

Cu, Cr y V muestran perfiles de enriquecimiento muy marcados (Figura 4.18), dado a que en algunos horizontes el enriquecimiento es incluso superior al 200% (Figura 4.18D, horizonte PL1-6). Cu y Cr en general tienen valores de τ_{ij} mayores y relativamente similares. El vanadio muestra un comportamiento similar en ambos usos de suelo, con valores de τ_{ij} positivos, pero menores que 0.5 (Figura 4.18; triángulos morados). El Cr revela mayor enriquecimiento en PL. El Cu por su parte muestra valores de τ_{ij} muy parecidos, en general cercanos a 1 en todos los perfiles, solo en

BN4 y PL1 tiene valores menores (menores a 0.5), exceptuando los horizontes BN4-1, BN4-8 y BN4-9, PL1-5 y PL1-6.

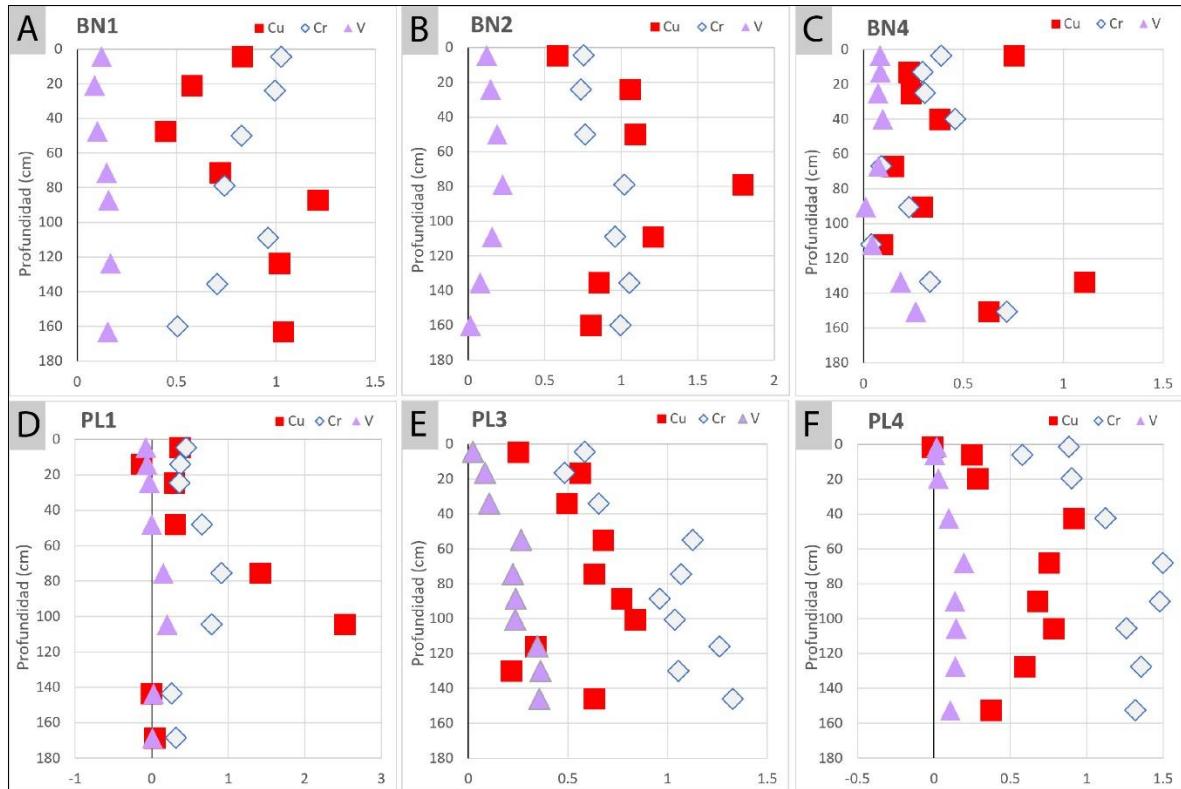


Figura 4.18: Perfiles de enriquecimiento del Cu, Cr y V. Un τ_{ij} igual a cero indicaría composición igual a la de la roca madre.

CaO y Na₂O reflejan pérdida total, ya que sus valores de τ_{ij} son ≈ -1 en la totalidad de los horizontes (Figuras 4.19).

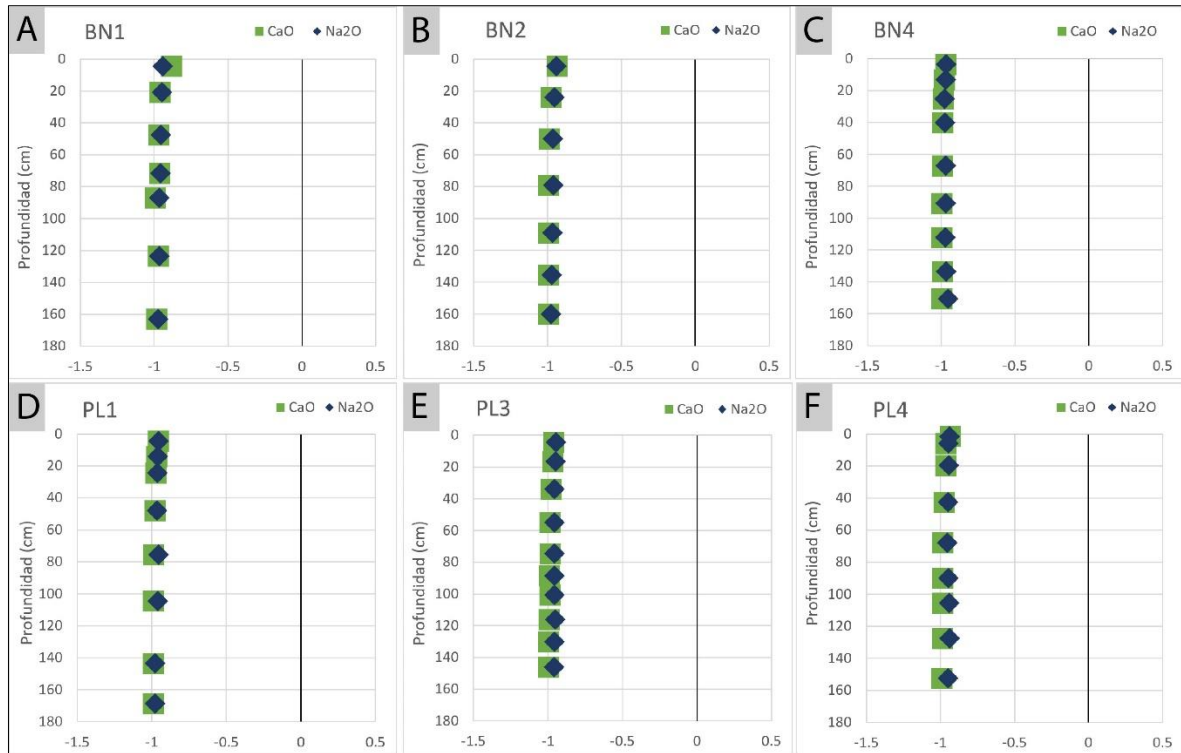


Figura 4.19: Perfiles de empobrecimiento del CaO y Na₂O. Un τ_{ij} igual a cero indicaría composición igual a la de la roca madre.

SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃ muestran perfiles de empobrecimiento con patrones similares (Figura 4.20), en los que (en la mayoría) el mayor empobrecimiento se da en los horizontes superiores, y, por lo tanto, hay una disminución de las pérdidas o incluso enriquecimiento (Fe y Al) en los 80 cm a 100 cm aproximadamente, en el horizonte B (Figura 4.20). De forma global, SiO₂ presenta valores de τ_{ij} menores y Fe₂O₃ los mayores, con algunos registros muy cercanos a 0 (Figura 4.20A; B; C y F), lo que indica que las concentraciones de estos son cercanos a los de la roca madre. Las pérdidas de estos elementos son algo menores en PL, con un τ_{ij} mínimo registrado de -0.51, versus el mínimo de -0.67 para BN.

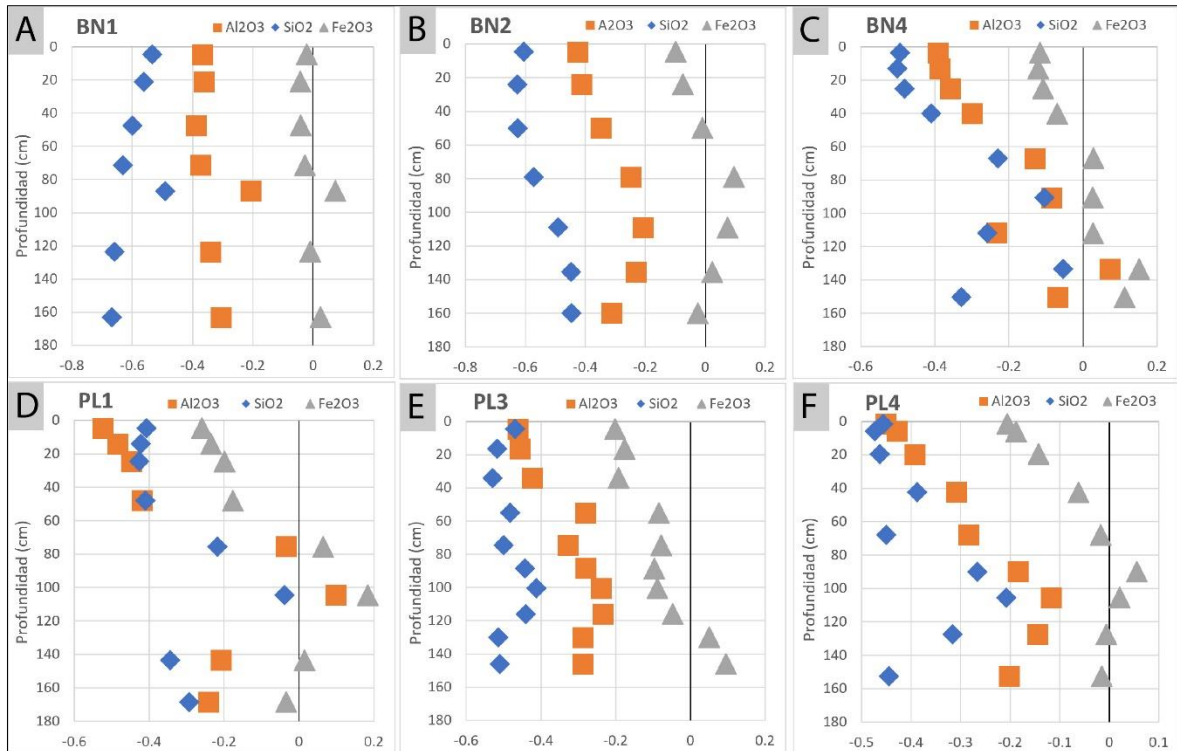


Figura 4.20: Perfiles de empobrecimiento del SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 . Un τ_{ij} igual a cero indicaría composición igual a la de la roca madre.

Otros constituyentes que describen perfiles de empobrecimiento son K, P, Mg, Mn (Figura 4.21) y Pb (Anexo B13). Estos elementos muestrean patrones similares, dentro de lo cual el que más difiere en algunos perfiles es el Mn. Los valores de τ_{ij} para el Mg son menores, indicando que este se encuentra más empobrecido en todos los sitios. El perfil PL4 muestra menor empobrecimiento en estos elementos, aunque en general los valores de τ_{ij} son parecidos para ambos usos de suelo. El Mn por su parte expone menor empobrecimiento, y enriquecimiento en algunos casos, en superficie y un aumento notorio de pérdidas en profundidad. Dentro de los BN, BN1 (Figura 4.21A) describe casi una línea diagonal entre el enriquecimiento de la parte superior al empobrecimiento en la parte inferior (diferencias entre horizontes es pareja), en BN2-1 (Figura 4.21B) hay un menor empobrecimiento notorio con respecto de BN2-2, desde donde τ_{ij} se mantiene más o menos constante hacia abajo en el perfil. En BN4 el aumento del empobrecimiento de Mn (de arriba hacia abajo) es más gradual (Figura 21.C) hasta los 110 cm aproximadamente, donde el empobrecimiento se hace menor. BN1 y PL4 para el Mn pueden ser considerados perfiles biogénicos (enriquecimiento-empobrecimiento).

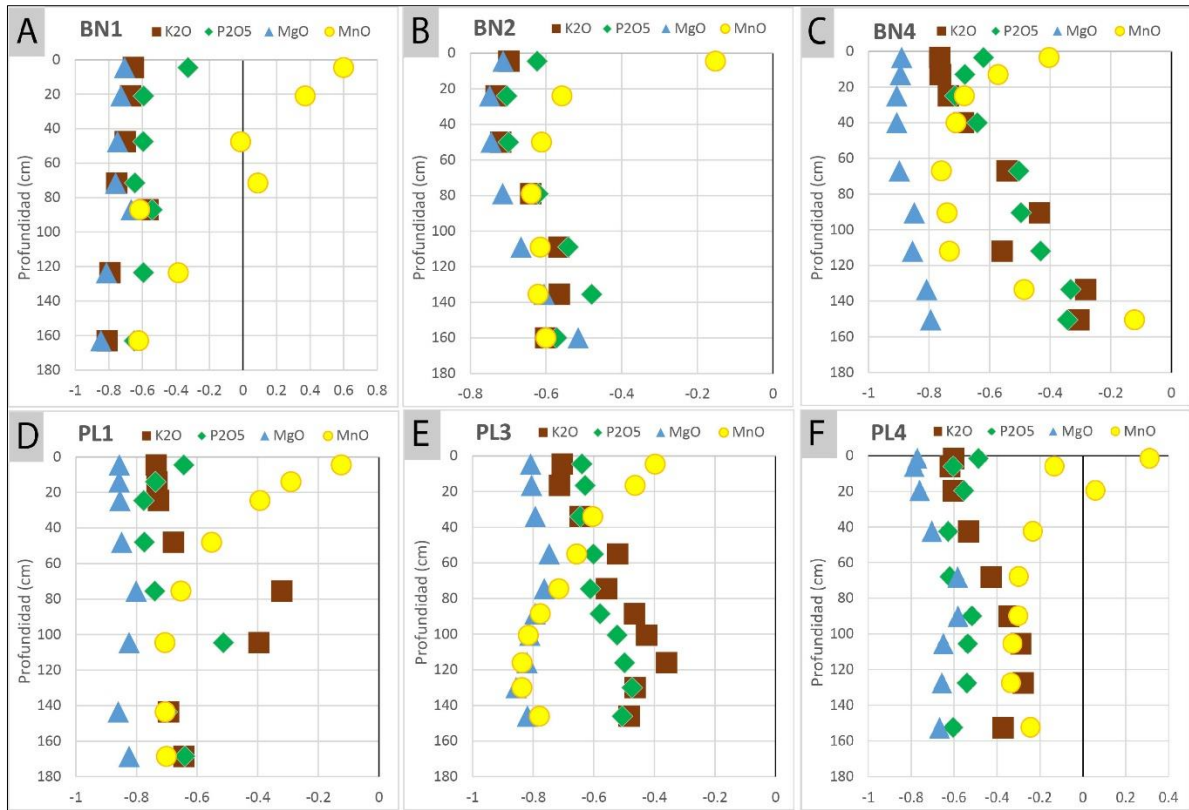


Figura 4.21: Perfiles de empobrecimiento del K_2O , P_2O_5 , MgO y MnO . Un τ_{ij} igual a cero indicaría composición igual a la de la roca madre.

4.2.3.4. Matrices de correlación

Se construye una matriz de correlación para cada uso de suelo, considerando los τ_{ij} de cada constituyente y además la profundidad media de cada horizonte (Tablas 4.12 y 4.13). Esto para tener una más efectiva visualización del comportamiento de los elementos dentro del perfil y entre ellos. Se considera como correlación positiva alta a los valores sobre 0.5, y una negativa o inversa alta a valores inferiores a -0.5.

En los suelos bajo bosque nativo las correlaciones positivas más fuertes se dan entre Al_2O_3 y K_2O , y entre el SiO_2 y el Zr, con 0.91 para ambos pares, entonces, se tiene que si aumenta el enriquecimiento o empobrecimiento (según corresponda) en Al_2O_3 , el K_2O lo hace. Lo mismo ocurre para el Zr con respecto al SiO_2 , si aumenta uno, el otro también lo hace. Otras correlaciones muy fuertes (sobre 0.8) son, de mayor a menor: Al_2O_3 -Pb (0.89); SiO_2 -Pb (0.85); MgO -Cr (0.85); SiO_2 - Al_2O_3 (0.84); Al_2O_3 - Fe_2O_3 (0.84); K_2O -Pb (0.83); SiO_2 - K_2O (0.83); MnO -CaO (0.81); MnO - Na_2O (0.80). Se destaca de esta matriz, la alta correlación en general de Pb con los óxidos mayoritarios (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , K_2O y P_2O_5); la alta correlación del MgO con los metales de transición Cr, Cu y Zn; la correlación entre CaO- Na_2O ; K_2O - P_2O_5 ; y las correlaciones negativas medias (>-0.6) que tiene el Zr con CaO, Na_2O , V, Cr, y Al_2O_3 .

Con respecto a la profundidad, se evidencia una clara correlación positiva en Al_2O_3 , Fe_2O_3 y Pb, con 0.60, 0.71 y 0.58 respectivamente, indicando que estos elementos se verían más enriquecidos (o menos empobrecidos) en los horizontes inferiores de los perfiles. El CaO, por otro lado, se vería con menores pérdidas en los horizontes más superficiales.

Tabla 4.12: Matriz de correlación constituyentes suelos bajo bosque nativo y profundidad (Prof.). En amarillo se destacan las correlaciones positivas mayores a un 0.5, en celeste las negativas menores que -0.5.

	Prof.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ (T)	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	V	Cr	Cu	Zn	Pb
Prof.	1														
SiO ₂	0.29	1													
Al ₂ O ₃	0.60	0.84	1												
Fe ₂ O ₃ (T)	0.71	0.46	0.84	1											
MnO	-0.35	-0.33	-0.32	-0.15	1										
MgO	0.29	-0.26	-0.07	0.24	0.22	1									
CaO	-0.54	-0.40	-0.50	-0.37	0.81	0.13	1								
Na ₂ O	-0.45	-0.37	-0.31	-0.09	0.80	0.26	0.74	1							
K ₂ O	0.47	0.83	0.91	0.75	-0.11	0.12	-0.34	-0.06	1						
P ₂ O ₅	0.40	0.64	0.69	0.65	0.26	0.15	0.13	0.15	0.80	1					
V	0.17	-0.27	0.18	0.49	0.17	0.07	0.01	0.36	0.14	0.10	1				
Cr	0.05	-0.56	-0.28	0.13	0.46	0.84	0.33	0.48	-0.11	-0.01	0.35	1			
Cu	0.26	-0.36	0.06	0.46	-0.01	0.51	0.00	0.16	-0.01	-0.03	0.66	0.64	1		
Zn	0.47	-0.06	0.24	0.59	0.38	0.80	0.19	0.30	0.36	0.48	0.28	0.75	0.54	1	
Pb	0.58	0.85	0.89	0.75	-0.28	-0.09	-0.41	-0.33	0.83	0.72	-0.03	-0.35	-0.11	0.29	1

Para los sitios bajo plantación, las correlaciones positivas más significativas se registran en, de mayor a menor: Al_2O_3 - Fe_2O_3 (0.91); K_2O -Cr (0.83); MgO-Zn (0.82); MnO-CaO (0.81); y Al_2O_3 - K_2O (0.80). Sobresalen también para esta matriz, la alta correlación positiva del Pb con varios de los óxidos mayoritarios (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , K_2O); del K_2O con P_2O_5 , V, Cr y Cu; y del Cu con SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 y K_2O . Por otro lado, el CaO registra una alta correlación negativa con los óxidos Fe_2O_3 , Al_2O_3 y K_2O (-0.74, -0.68 y 0.56, respectivamente), y con V (-0.66) y Pb (-0.78).

Considerando la profundidad, la mayor correlación se da con el Pb, por lo tanto, en los sitios bajo plantación, el Pb se ve más enriquecido o menos empobrecido en los niveles más profundos del perfil, lo contrario sucede para el CaO que tiene una fuerte correlación negativa (-0.82), por lo tanto, se ve más enriquecida o con menor pérdida en los horizontes superiores.

Tabla 4.13: Matriz de correlación constituyentes suelos bajo plantación y profundidad (Prof.). En amarillo se destacan las correlaciones positivas mayores a un 0.5, en celeste las negativas menores que -0.5.

	Prof.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ (T)	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	V	Cr	Cu	Zn	Pb
Prof.	1														
SiO₂	0.33	1													
Al₂O₃	0.70	0.77	1												
Fe₂O₃(T)	0.78	0.58	0.91	1											
MnO	-0.58	-0.07	-0.41	-0.46	1										
MgO	0.14	0.17	0.31	0.31	0.35	1									
CaO	-0.82	-0.26	-0.68	-0.74	0.81	-0.11	1								
Na₂O	-0.36	-0.11	-0.08	-0.13	0.59	0.55	0.41	1							
K₂O	0.58	0.45	0.80	0.74	-0.21	0.60	-0.56	0.38	1						
P₂O₅	0.33	0.03	0.33	0.43	-0.01	0.31	-0.11	0.48	0.56	1					
V	0.55	-0.07	0.50	0.64	-0.63	0.16	-0.66	0.07	0.66	0.62	1				
Cr	0.38	0.03	0.45	0.53	-0.03	0.75	-0.37	0.52	0.83	0.61	0.69	1			
Cu	0.17	0.64	0.71	0.60	-0.29	0.18	-0.37	0.06	0.53	0.20	0.39	0.31	1		
Zn	0.23	0.24	0.35	0.29	0.12	0.82	-0.34	0.33	0.50	0.05	0.08	0.53	0.23	1	
Pb	0.85	0.52	0.75	0.79	-0.39	0.40	-0.78	-0.22	0.62	0.24	0.39	0.44	0.34	0.59	1

Se elabora para cada uso de suelo una tabla resumen de las correlaciones (Tabla 4.14). Una similitud destacable entre BN y PL es la correlación positiva del Al y Fe con la profundidad, y Ca negativa. También, en ambos existe una correlación fuerte entre Al y Fe, Al-K, Al-Si, K y P, al igual que el Mn con el Na y Ca. Por otro lado, en PL se observa una correlación positiva del K con la profundidad, lo que no ocurre en el caso de los BN, además de una correlación negativa del Mn con la profundidad que tampoco se presenta en BN; en PL, Ca muestra correlación negativa con Fe, K, V, Pb, lo que no se da en BN. Si se encuentra correlacionado al Fe y Cu en PL, pero no en BN, y con P y K en BN, pero no en PL. Por último, en PL el Mg se correlaciona con Na y K, lo que no ocurre en BN.

Tabla 4.14: Resumen correlaciones importantes.

	Positiva		Negativa			Positiva		Negativa	
	≥ 0.8	0.79 a 0.5	≤ -0.8	-0.79 a -0.5		≥ 0.8	0.79 a 0.5	≤ -0.8	-0.79 a -0.5
NATIVO	SiO ₂ -Al ₂ O ₃	SiO ₂ -P ₂ O ₅		SiO ₂ -Cr	PLANTACIÓN	Al ₂ O ₃ -Fe ₂ O ₃	SiO ₂ -Al ₂ O ₃		Al ₂ O ₃ -CaO
	SiO ₂ -K ₂ O	Al ₂ O ₃ -P ₂ O ₅		Al ₂ O ₃ -CaO		Al ₂ O ₃ -K ₂ O	SiO ₂ -Fe ₂ O ₃		Fe ₂ O ₃ -CaO
	SiO ₂ -Pb	Fe ₂ O ₃ -K ₂ O				MnO-CaO	SiO ₂ -Cu		MnO-V
	Al ₂ O ₃ -Fe ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ -P ₂ O ₅				MgO-Zn	SiO ₂ -Pb		CaO-K ₂ O
	Al ₂ O ₃ -K ₂ O	Fe ₂ O ₃ -Zn				K ₂ O-Cr	Al ₂ O ₃ -Cu		CaO-V
	Al ₂ O ₃ -Pb	Fe ₂ O ₃ -Pb					Al ₂ O ₃ -Pb		CaO-Pb
	MnO-CaO	MgO-Cu					Fe ₂ O ₃ -K ₂ O		
	MnO-Na ₂ O	MgO-Zn					Fe ₂ O ₃ -V		
	MgO-Cr	CaO-Na ₂ O					Fe ₂ O ₃ -Cr		
	K ₂ O-Pb	K ₂ O-P ₂ O ₅					Fe ₂ O ₃ -Cu		
		P ₂ O ₅ -Pb					Fe ₂ O ₃ -Pb		
		V-Cu					MnO-Na ₂ O		
		Cr-Cu					MgO-Na ₂ O		
		Cr-Zn					MgO-K ₂ O		
		Cu-Zn					MgO-Cr		
		PROF-Al ₂ O ₃		PROF-CaO			Na ₂ O-Cr		
		PROF-Fe ₂ O ₃					K ₂ O-P ₂ O ₅		
		PROF-Pb					K ₂ O-V		
					K ₂ O-Cu				
					K ₂ O-Pb				
					P ₂ O ₅ -V				
					P ₂ O ₅ -Cr				
					V-Cr				
					Cr-Zn				
					Zn-Pb				
					PROF-Pb	PROF-Al ₂ O ₃	PROF-CaO	PROF-MnO	
						PROF-Fe ₂ O ₃			
						PROF-K ₂ O			
						PROF-V			

5. DISCUSIÓN

5.1. Evidencia de meteorización química

En general, los perfiles de empobrecimiento reportan pérdida de elementos desde la superficie por disolución mineral (Brantley *et al.*, 2007). Los resultados relacionados al cálculo del coeficiente de transferencia de masa muestran que la mayoría de los elementos constituyentes de los suelos analizados fueron lixiviados por procesos de meteorización (empobrecidos).

Nesbit *et al.* (1980) y Nesbit & Young (1984) señalan que las etapas tempranas de meteorización en una roca granítica se caracterizan por el agotamiento o reducción del Ca, Na y K, en este caso, los constituyentes que muestran pérdidas más significativas corresponden a Na y Ca, con todos sus valores de $\tau_{ij} \approx -1$ (pérdida total del elemento). Esto último se asocia a la disolución de las plagioclasas (Brantley *et al.*, 2007; White, 1995) y a la posterior re-movilización por procesos de lixiviación o re-precipitación a mineralogía secundaria como arcillas (Blum & Stillings, 1995). La porción mineral de los suelos se condiciona por su contenido en el material original y más importante aún, por su estabilidad, la mayoría de los minerales primarios que forman las rocas son termodinámicamente inestables frente a las presiones y temperaturas de la superficie, lo que los hace susceptibles a la meteorización química (Mediavilla, 2014; Prestrud *et al.*, 2007; Voroney, 2007; White & Buss, 2013). La plagioclasa y feldespato potásico constituyen los minerales más susceptibles a la meteorización química (minerales lábiles; Jenny, 1994; Nesbit & Young, 1989; Schlater, 1977).

El Mg registra pérdidas de más de un 70% en la mayoría de los horizontes en los sitios bajo bosque nativo, y en los sitios bajo plantación forestal las pérdidas llegan a incluso más de un 80% (NOPL1 Y NOPL3), situación similar ocurre con el K y P, que muestran pérdidas de más de un 50% en la mayoría de los horizontes, tanto en NOBN como en NOPL, llegando a 70% en algunos horizontes, y más de 80% en el caso del horizonte B5 en NOBN1 (K). Se ha mostrado que la secuencia de meteorización para rocas ígneas (en general), corresponde al orden inverso de la serie de Bowen (Goldich, 1938; González, 2017). Así, el empobrecimiento de Mg, que puede deberse a, entre otros procesos, oxidación de biotita u hornblenda y de igual forma la pérdida de K (Buss *et al.* 2008), podrían interpretarse como una etapa más bien avanzada de meteorización química (White & Buss, 2013).

Gran parte de los elementos empobrecidos en la presente investigación, tienen un $|\tau_{ij}| > 0.1$, lo que indica que son altamente activos y muestran obvia migración (Chen *et al.*, 2008), el Fe por su parte, tiene $|\tau_{ij}| < 0.1$, lo que demuestra que este elemento migra levemente, por lo tanto, corresponde a un constituyente de migración moderadamente activa (Ling *et al.*, 2014). De esta forma, la activa migración de elementos da prueba de la ocurrencia de los mencionados procesos de meteorización química, con un orden estimado de migración según $|\tau_{ij}|$ de los elementos que presentan

empobrecimiento, para NOBN de $\text{CaO} \approx \text{Na}_2\text{O} > \text{MgO} > \text{K}_2\text{O} > \text{P}_2\text{O}_5 > \text{SiO}_2 > \text{MnO} > \text{Zn} > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{Pb} > \text{Fe}_2\text{O}_3(\text{T})$; y para NOPL de $\text{CaO} \approx \text{Na}_2\text{O} > \text{MgO} > \text{P}_2\text{O}_5 > \text{K}_2\text{O} > \text{MnO} > \text{SiO}_2 > \text{Pb} > \text{Zn} > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{Fe}_2\text{O}_3(\text{T})$.

Por otro lado, un elemento que se lixivia en horizontes superficiales puede re-precipitar en horizontes más profundos, y generar perfiles de empobrecimiento-enriquecimiento (Brantley *et al.*, 2007; White & Buss, 2013), tal como ocurre con el del Fe, y Al en algunos casos. Sus perfiles enseñan una evidente acumulación a una profundidad aproximada de entre 90 y 130 cm (horizontes B en todos los perfiles), lo que podría guardar relación con la precipitación de mineralogía secundaria como óxidos de Fe producto de, por ejemplo, la oxidación de biotita (Buss *et al.*, 2008; White & Buss, 2013), o arcillas como la caolinita que tiende a retener el Al en su estructura (Blum & Stilling, 1995; White & Buss, 2013). Esto último es congruente con la identificación de dichos minerales en la descripción *in situ* de los perfiles, y con lo expuesto por Castillo *et al.* (*In Prep*), que, mediante el análisis mineralógico de muestras de suelos graníticos del parque, tanto bajo bosque nativo como bajo plantaciones, determinan de manera más específica la ocurrencia de vermiculita, illita, caolinita, gibbsita y goetita. Otro de los resultados obtenidos que puede dar cuenta de esto son las matrices de correlación de Pearson elaboradas para ambos usos de suelo, por ejemplo, la alta correlación Fe-Al se puede asociar a la reacción de estos elementos para formar caolinita (Ganor *et al.*, 2007), que corresponde a la arcilla predominante en los suelos analizados (Castillo *et al.*, *In Prep*). La correlación negativa entre Al y Ca, igualmente puede indicar alteración a caolinita, donde Ca y Na son liberados y hay aumento o retención de Al en horizontes profundos (Ganor *et al.*, 2007).

Toda esta información, permite realizar una comparación del grado de meteorización química de NOPL con respecto de NOBN, lo que será discutido de manera más concreta posteriormente en el apartado 5.5.

5.2. Contaminación por actividad antrópica

Las entradas o *inputs* de un elemento en un suelo determinado se dan por aportes externos, en general depositación de partículas secas y fijación desde la atmósfera (Brantley *et al.*, 2007). Wang *et al.* (2017) plantean la deposición atmosférica como una de las principales vías de entrada de sustancias tóxicas en la superficie terrestre, tanto en suelos como en cuerpos de agua. En el caso de estudio, se muestran ganancias en tres elementos en particular, V, Cr y Cu, las que pueden ser atribuidas al fenómeno de deposición atmosférica tanto seca (partículas secas o en forma de gases en la atmósfera) como húmeda (partículas contaminantes disueltas o mezcladas con la lluvia). Una de las fuentes más cercanas de contaminantes a la atmósfera es la urbanización aledaña, por medio de actividades cotidianas como transporte y/o calefacción (estufas a leña/ carbón). Según Suryawanshi *et al.*, (2016), los vehículos motorizados son una de las fuentes principales de emisión de material particulado de metales pesados a la atmósfera, entre los que se encuentran Cr y Cu. Por su parte, el V es uno de los elementos comúnmente liberados por el proceso de combustión de

carbón (Bartonová *et al.*, 2023). A pesar de esto, estas fuentes no se consideran lo suficientemente significativas como para ser catalogadas como únicas contribuyentes, sino que sería más bien un conjunto de estas consideradas emisiones locales, con la industrialización existente en áreas circundantes un poco más alejadas.

Dentro de “El Gran Concepción” han existido a lo largo de los años, industrias de diversos rubros, varias aún en operación, los *inputs* en los suelos del área de estudio pueden explicarse por algunas de estas actividades, por ejemplo, industrias que utilizan combustión de petróleo o carbón para generar energía (V, Cu, Cr; Cong *et al.*, 2010; Hu & Balasubramanian, 2003; Kamani *et al.*, 2013), e industrias metalúrgicas (Cr y Cu; Kamani *et al.*, 2013; Cereceda-Balic *et al.*, 2020). Entre ellas se encuentran: refinería de petróleo de ENAP (Hualpén; V, Cr), las industrias siderúrgicas Huachipato (Talcahuano; Cr, Cu) o INDAMA (Chiguayante; Cr, Cu), Fanaloza (Penco; V; cese de producción en agosto de 2023), entre otras menores. Las refinerías de petróleo contribuyen sustancialmente a la contaminación atmosférica, esto mediante emisiones de hidrocarburos, dióxido sulfúrico, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y material particulado, entre los que se pueden encontrar los metales enriquecidos en los suelos del parque (Adebiyi, 2022). Industrias como Fanaloza, tienen entre sus varios procesos de producción, etapas que utilizan ignición de diferentes combustibles fósiles (CONAMA, 1999), que como se mencionó anteriormente, pueden aportar contaminantes como V. Si bien esta última dejó de operar el presente año, fue fundada en 1888 (Fanaloza, s/f), con lo que tuvo muchos años de operación para aportar contaminantes. De las industrias mencionadas la más cercana es INDAMA (Industria de Acero Manquimávida), empresa especializada en la producción de perfiles de acero, y que entre sus procesos incluye cromados, que como el nombre lo indica, involucra al Cr. Esta última lleva operando desde 1964 a la actualidad (INDAMA, s/f).

5.3. Influencia de la geología en la geoquímica del suelo del parque

Numerosos autores (Anderson, 1988; Berner & Berner., 2003; Jenny, 1994; Rankama & Sahama, 1950) mencionan que el suministro original de elementos en un suelo es determinado por la litología de la cual proviene su material parental. De esta forma, la principal fuente de nutrientes como Ca, Mg, K, Na, Si y Fe es la meteorización mineral (Anderson, 1988; Berner & Berner., 2003; White & Buss, 2013).

El material parental de los suelos en la totalidad de los sitios proviene del Batolito Costero del Sur (Carbonífero-Pérmico; Creixell, 2001), cuyas rocas contemplan granodioritas y tonalitas en mayor medida, junto a cuarzodiorita, granitos, algunos cuerpos pegmatíticos y xenolitos que las afectan. La mineralogía formadora principal de estas rocas son plagioclasa, feldespato potásico y cuarzo, con otros minerales en menor proporción (Creixell, 2001; Streckeisen, 1967). En específico para las rocas del batolito se han identificado aparte de los silicatos principales: biotita, anfíbola, anfíbola cálcica, mica blanca (muscovita) y minerales accesorios como circón, apatito, epidota, turmalina, titanita, además de algunas alteraciones locales en plagioclasas y microclinas

(plagioclasas a sericita, arcillas o clorita; microclina a arcilla; Creixell, 2001). Dicha composición se ve bien reflejada en la porción mineral de los suelos del parque. Como se menciona en el apartado 5.1, los contenidos de Na y Ca se relacionan a la disolución de la plagioclasa (Brantley *et al.*, 2007; White, 1995), el que sean los elementos más empobrecidos además da cuenta de esto, ya que este mineral corresponde al más susceptible a disolución (Jenny, 1994; Schlater, 1977), por ende, estos llevan más tiempo de haber sido liberados y lixiviados. La disolución del feldespato potásico también puede aportar Na, además de K (Hüseyin *et al.*, 2018). El contenido de Mg puede ser causado por la presencia de minerales de mica, como la biotita (Buss *et al.*, 2008; Hüseyin *et al.*, 2018), al igual que el contenido de K y Fe (Buss *et al.*, 2008). El P primario usualmente viene del apatito (White & Buss, 2013).

Por otro lado, la presencia de niveles conglomerádicos en algunos de los perfiles da constancia de posibles remociones en masa producto de las condiciones topográficas de los sitios de estudio, todos en alta ladera y dentro de cordones graníticos con mayormente roca disgregada susceptible a erosión y deslizamientos en las laderas de mayor pendiente (Ramirez, 2004). Para suelos en laderas o cuencas, el transporte lateral de material por procesos erosivos ejerce gran control en la variedad de las propiedades del suelo, los clastos claramente menos alterados que el suelo circundante pueden proporcionar una fuente de nutrientes adicional a medida que se ven afectados por los procesos de meteorización (Admundson, 2003).

5.4. Aspectos biogeoquímicos

Es bien sabido que los microorganismos, plantas y animales influyen las propiedades del suelo (Jenny, 1994). En los diagramas τ_{ij} v/s profundidad del Mn es posible distinguir que la distribución de este constituyente a lo largo de los perfiles de suelo se ve intervenida por actividad biológica, todos sus perfiles exhiben una tendencia clara a la acumulación en los horizontes más superficiales (más o menos hasta los 20 cm), con aumento del empobrecimiento hacia profundidad, lo que se considera característico de perfiles biogénicos (White & Buss, 2013), en el horizonte Oi de NOBN1 el enriquecimiento es tal que su concentración fue identificada como dato *outlier*. El Mn constituye un micronutriente importante para las plantas (Cazó, 2012; Millaleo *et al.*, 2010; Li *et al.*, 2021), Li *et al.* (2021) hacen mención de que la ciclicidad o reciclaje del Mn a través de la vegetación, por ejemplo, por consumo y posterior “devolución” al suelo a través de caída del *litter*, lo que puede provocar, después de unas décadas, su acumulación en la superficie de los suelos. En otras palabras, las plantas consumen y concentran Mn en su tejido foliar y posteriormente lo acumula en las capas de hojarasca del suelo (Morris *et al.*, 2020). Por su parte, el Ca, a pesar de que describe solo perfiles de empobrecimiento con pérdidas de casi el 100% respecto de la roca madre, se distribuye igualmente mostrando una tendencia a menor empobrecimiento en la superficie, lo que por su naturaleza de macronutriente esencial puede guardar relación con la acumulación biológica por las plantas (Akbar *et al.*, 2010 en Huseyn, 2018) y su retención por la materia orgánica, más elevada en los horizontes superficiales. Otra manera de retorno de bioelementos al suelo es el pluviolavado,

donde las precipitaciones que atraviesan el dosel arbóreo captan algunos de los nutrientes que, por ejemplo, exudan los árboles a través de sus hojas (Santa Regina *et al.*, 1989).

5.5. Influencia del cambio de uso de suelo en la geoquímica de suelo del Parque Nacional Nonguén

Si bien Ca, Na y Mg coinciden como los elementos más empobrecidos para ambos usos de suelo, existen variaciones para los demás constituyentes, por ejemplo, en PL el P está más empobrecido. El P es uno de los nutrientes esenciales para las plantas (Cazó, 2012), por tanto, esta diferencia podría guardar alguna relación con el tipo de vegetación presente y sus características particulares de consumo, retención y devolución de nutrientes. Por ejemplo, la calidad del *litter* desarrollado bajo plantaciones se descompone más lentamente que la de bosques nativos (Quan *et al.*, 2014; Schlatter & Otero, 1995), lo que dificulta o lentifica el retorno de nutrientes al suelo subyacente. En términos generales se reconoce que hay mayor retención de nutrientes en la biomasa alta en los bosques de coníferas en comparación con bosques de hoja ancha (Quideau *et al.*, 2001), Schlatter & Otero (1995) proponen que el bosque nativo tiene una mejor dinámica en el ciclo de nutrientes, ya que incorpora más rápido sus reservas orgánicas y nutritivas al suelo mineral, beneficiando su reutilización, razón por la que podría estar ocurriendo el mencionado mayor empobrecimiento de P en PL. Otro de los elementos que puede verse afectado por este fenómeno es el Mn, que se encuentra menos empobrecido en los suelos bajo bosque nativo, pero a pesar de esto, en el nivel más superficial de los perfiles, parece tener mayor disponibilidad bajo las plantaciones. Esto último se puede asociar a la menor descomposición de la hojarasca bajo pino, que lleva a una mayor acumulación de los elementos que la constituyen (Schlatter & Otero, 1995). La tendencia al mayor empobrecimiento en los suelos bajo plantación forestal es más bien general para todos los nutrientes (excepto para el K), lo que al igual que los casos mencionados anteriormente, pueden ser atribuidos a las variaciones en la dinámica de descomposición de la hojarasca entre ambos tipos de uso de suelo. Castillo *et al.* (*In Prep*) relaciona además la disminución de cationes intercambiables en los suelos bajo PL en el parque a la capacidad de las plantaciones productivas de acumular nutrientes en menores escalas de tiempo. Actualmente es reconocido que la demanda de nutrientes de los árboles forestales es comparativamente más alta (Sadzawka *et al.*, 1995).

Otro factor que puede afectar la disponibilidad de nutrientes en los suelos es el pH (Vásquez *et al.*, 2013 en Carvajal, 2016). Autores como Schlatter & Otero (1995) muestran que hay una tendencia general acidificación de los suelos bajo plantación forestal en comparación con bosques nativos chilenos, entre ellos de tipo valdiviano como el del área de estudio. Castillo *et al.* (*In Prep*) determinan que dentro del parque esto último se cumple, y existe una disminución del pH en sitios bajo plantación, sobre todo en los horizontes medios e inferiores.

Por otro lado, variaciones no tan solo ocurren a nivel composicional, sino que también en sus propiedades físicas. Los suelos bajo bosque nativo (NOBN) tienen, por ejemplo, mayor contenido

de raíces. Los perfiles bajo plantación forestal (NOPL) muestran límites mejor definidos y mayor desarrollo de óxidos en horizontes B, lo que, a su vez, hace variar la coloración de los suelos, por ejemplo, más rojiza en presencia de óxidos de Fe. La mayor proporción de óxidos probablemente se debe a la mayor o más rápida meteorización que resulta en la precipitación de esta mineralogía secundaria. También puede verse afectada la porosidad de los suelos, aunque este punto en este caso también puede tener otros factores que influyan, como la ya mencionada presencia de niveles conglomerádicos.

6. CONCLUSIÓN

En base a lo que revelan los resultados de este trabajo, se concluye que la transición de bosque nativo a plantación exótica de pino tiene un impacto significativo tanto en la geoquímica de los suelos del parque, como en sus características físicas. Entre los resultados más relevantes, se consideran los cálculos de coeficiente de transferencia de masa, que permiten constatar las diferencias en la distribución de los constituyentes del suelo a lo largo del perfil, junto a variaciones en la disponibilidad de nutrientes esenciales. Además, a pesar de que el empobrecimiento producto de procesos relacionados a la meteorización química de la roca madre ocurre bajo ambos usos, disparidades como el mayor empobrecimiento promedio en PL en gran parte de los elementos constituyentes, la mayor presencia de óxidos, la aparente acumulación de nutrientes en superficie (menor empobrecimiento que BN) con pérdidas más significativas en profundidad, proporcionan antecedentes adicionales que refuerzan lo predicho en la hipótesis principal y permiten asociar estas variaciones a procesos específicos como el aporte de nutrientes propio de cada tipo de vegetación por medio de exudados o funciones vitales semejantes (ciclicidad de los elementos a través de la vegetación).

Los datos brindan una aproximación inicial hacia el entendimiento de lo que ocurre en los suelos del parque y permiten hacer conclusiones relevantes, sin embargo, existen en parte algunas limitaciones a la hora entregar una respuesta definitiva dado a los múltiples factores que interactúan en el sistema edáfico, por ejemplo, puntos mencionados en la discusión como el pH bajo cada uso de suelo o nutrientes aportados por el pluviolavado pueden ser analizados de forma más específica.

Esto último se traduce entonces, en que el presente estudio no solo revela que el cambio de bosque nativo a forestal efectivamente altera el grado de meteorización química (aparentemente mayor bajo plantaciones) y la geoquímica de los suelos bajo el Parque Nacional Nonguén, sino que también destaca la importancia del estudio del cambio de uso de suelo en el mundo actual y deja abiertas nuevas opciones de investigación, donde podrían analizarse, para cada tipo de vegetación, parámetros como el pH, composición de las soluciones aportadas por pluviolavado o incluso, la contaminación por los metales que están enriquecidos por igual en ambos tipos de suelo (Cr, Cu y V) con ganancias de hasta un 150 a casi 200% en algunos horizontes. Este último punto de hecho representa un nivel base esencial para comprender el grado de depositación atmosférica de metales y otros elementos tóxicos dentro del área protegida, y permite por tanto evaluar la influencia directa de la contaminación atmosférica en los suelos, con lo que se podría estimar si en algún punto se alcanzarán concentraciones que puedan ser perjudiciales para la diversidad biológica del parque o la comunidad en general.

7. REFERENCIAS

- ACTLABS, 2018. Analytical Report. Activation Laboratories-Agriculture Division. 2pp. Ancaster.
- ADEBIYI, F., 2022. Air quality and management in petroleum refining industry: A review. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*. Vol. **4**: 89-96.
- ADMUNSON, R., 2003. Soil Formation. Treatise on geochemistry (Davis, A.; Holland, H. & Turekian, K. editor). Elsevier: 203 pp. Berkeley.
- AGUAYO, M.; PAUCHARD, A.; AZÓCAR, G. & PARRA, O. 2009. Cambio del uso del suelo en el centro sur de Chile a fines del siglo XX. Entendiendo la dinámica espacial y temporal del paisaje. *Revista Chilena de Historia Natural*. Vol. **82**: 361-374. Concepción.
- AGUIRRE, L.; GODOY, E. & HERVÉ, F. 1972. Distribution of metamorphic facies in Chile: an outline. *Krystallinikum*. Vol. **9**: 7-19.
- ALIAGA, G., 2016. Caracterización geoquímica de los suelos en la cuenca de Rancagua (34°S-34°15' y 70°30'-71°O). Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. Memoria para optar al título de geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra: 96 pp., Concepción.
- ANDERSON, D. 1988. The effect of parent material and soil development on nutrient cycling in temperate ecosystems. *Biogeochemistry*. N°1. Vol. **5**: 71-97.
- BARTONOVÁ, L.; RAKLAVSKÁ, H. & NAJSER, J. 2023. Vanadium – Valuable and toxic element in coal combustion ash: An overview. *Process Safety and Environmental Protection*. Vol. **172**: 923-940.
- BCN. 2010. Biblioteca del Congreso Nacional: Sistema integrado de información Territorial (SIIT); Región del BíoBío. Disponible en: <http://www.bcn.cl/siit/regiones/region8/relieve.htm>. Consultado el 23.11.2010.
- BERNER, E. & BERNER, R. 2003. Plants and Mineral Weathering: Present and Past. Treatise on geochemistry (Davis, A.; Holland, H. & Turekian, K. editor). Elsevier: 203 pp. Berkeley.
- BLUM, A. & STILLINGS, L., 1995. Feldspar Dissolution Kinetics. Chemical Weathering Rates of Silicate Minerals. White & S. Brantley (Ed.). De Gruyter: pp. 291-352. Berlin; Boston.

- BÖRGEL, R. 1983. Geografía de Chile, Geomorfología. Instituto Geográfico Militar: 182 pp. Santiago.
- BRANTLEY, S; GOLDBERGER, M & RAGNARSDOTTIR, V. 2007. Crossing disciplines and scales to understand the critical zone. *Elements*. Vol. **3**: 307-314.
- BRIMHALL, G. & DIETRICH, W., 1987. Constitutive mass balance relations between chemical composition, volume, density, porosity, and strain in metasomatic hydrochemical systems: Results on weathering and pedogenesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol. **51**: 567-587.
- BUSS, H; SAK, P; WEBB, S & BRANTLEY, S. 2008. Weathering of the Rio Blanco quartz diorite, Luquillo Mountains, Puerto Rico: Coupling oxidation, dissolution, and fracturing. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol. **72**: 4488-4507.
- CASTILLO, E. 2008. Geomorfología del río Andalién, Chile. *Revista Geográfica*. Vol. **143**: 97-116.
- CASTILLO, P.; ABURTO, F.; ALBORNOZ, M.; CROVO, O.; CZIMKZIK, C. & SOUTHARD, R. Natural Forest conversion to Exotic Pine plantations induces soil mineralogical changes – Implications for soil organic carbon stabilization. *In Prep*.
- CARIGLINO, B.; MOISAN, P. y LARA, M.B. 2021. The fossil record of plant-insect interactions and associated entomofaunas in Permian and Triassic floras from southwestern Gondwana: A review and future prospects. *Journal of South American Earth Science*. Vol. **111**: 22 pp.
- CARTES, B. 2021. Conflictos ambientales relacionados a la hidrogeología de humedales San Pedro-Coronel y carreteras Puente industrial y Pie de Monte. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 215 pp. Concepción.
- CAZÓ, O., 2012. Los suelos y la nutrición mineral de las plantas. cátedra de Edafología: Carrera de Bioquímica. Universidad Nacional de Asunción. San Lorenzo-Paraguay.
- CERECEDA-BALIC, F; DE LA GALA-MORALES, M; PALOMO-MARÍN, R; FADIC, X; VIDAL, V; FUNES, M; RUEDA-HOLGADO, F & PINILLA-GOL, E. 2020. Spatial distribution, sources, and risk assessment of major ions and trace elements in rainwater at Puchuncaví Valley, Chile: The impact of industrial activities. *Atmospheric Pollution Research*. Vol. **11**: 99-109.

- CHASE T.; PIELKE, R.; KITTEL, T.; NEMANI, R. & RUNNING, R. 2000. Simulated impacts of historical land cover changes on global climate in northern winter. *Climate Dynamics*. Vol. **16**: 93-105.
- CHEN, Y.; LI, X.; HAN, Z.; YANG, S.; WANG, Y. & YANG, D., 2008. Chemical weathering intensity and element migration features of the Xiashu loess profile in Zhenjiang, Jiangsu Province. *Journal of Geographical Sciences*. Vol. **18**: 341-352.
- CLAUSSEN, M.; BROVKIN, V. & GANOPOLSKI, A. 2001. Biogeophysical versus biogeochemical feedbacks of large-scale land cover change. *Geophysical Research Letters*. Vol. **28**: 1011-1014.
- COMISIÓN NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE (CONAMA) - REGIÓN METROPOLITANA, 1999. Guía para el control y prevención de la contaminación industrial: fabricación de objetos de barro, loza y porcelana. 82 pp.
- CONAF s/f. Parque Nacional Nonguén. Corporación Nacional Forestal. <https://www.conaf.cl/parques/parque-nacional-nonguen/>
- CONAF, 2015. Catastro y Actualización de los Recursos Vegetacionales y Uso de la Tierra de la Región del Biobío (VIII).
- CONAF. 2019. Plan de Manejo Reserva Nonguén. Santiago, Chile: Unidad de gestión Patrimonio Silvestre, Corporación Nacional Forestal.
- CONG, Z.; KANG, S.; ZHANG, Y. & LI, X. 2010. Atmospheric wet deposition of trace elements to central Tibetan Plateau. *Applied Geochemistry*. Vol. **25**: 1415-1421.
- CORREA-ARANEDA, F. & SALAZAR, C. 2014. Caracterización fisicoquímica del agua del estero Nonguén y su confluencia con el río Andalién, región del Biobío. Variación en relación a los distintos usos de suelo en su cuenca. *Sustainability, Agri, Food and Environmental Research*. Vol. **2**, (2): 33-46.
- CREIXELL, C. 2001. Petrología y Geotermobarometría de las Rocas Intrusivas de la Cordillera de la Costa entre los 36°30' S y 38°00' S. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 149 pp., Concepción.
- CRODA. 2023. Croda International Plc. <https://www.crodacropcare.com/es-mx/market-areas/micronutrients>.

- CROVO, O.; ABURTO, F.; ALBORNOZ, M, & SOUTHARD, R. 2021. Soil type modulates the response of C, N, P stocks and stoichiometry after native forest substitution by exotic plantations. *Catena*. Vol. **197**: 1-13.
- DICASTRI F & HAJEK E. 1976. Bioclimatología de Chile. Santiago, Chile. Editorial Universidad Católica de Chile. 128 pp.
- ECHEVERRÍA, C.; GATICA, P.; ROMÁN S.; BORDEU A. & ESPINOZA, C., 2021. Más allá de la deforestación: Restauración ecológica de bosques nativos en el Parque Nacional Nonguén, Chile. Quezada, M.: 123 pp. Concepción.
- EPA. 2018. United States Environmental Protection Agency. <https://19january2021snapshot.epa.gov/report-environment/land-use.html#definition>.
- EULA. (2002). Estudio básico zonificación del fundo Nonguén. Concepción.
- FANALOZA. (s/f). Patrimonioindustrialbiobio.Cl. Recuperado el 31 de octubre de 2023, de <https://patrimonioindustrialbiobio.cl/fanaloza/>
- FIGUEROA, G. 2020. Caracterización hidrogeológica de Talcahuano entre los 36°44'-36°49'S y 73°00'-73°08'W, Región del Biobío, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 122 pp. Concepción.
- FOLEY, J.; DEFRIES, R.; ASNER, G.; BARFORD, C.; BONAN, G.; CARPENTER, S.; CHAPIN, F.; COE, M.; DAILY, G.; GIBBS, H.; HELKOWSKI, J.; HOLLOWAY, T.; HOWARD, E.; KUCHARIK, C.; MONFREDA, C.; PATZ, J.; PRENTICE, I.; RAMANKUTTY, N. & SNYDER, P. 2005. Global Consequences of Land Use *Jonathan Science*. Vol. **309**: 570-574.
- FRUTOS, J.; MENCARINI, P.; PINCHEIRA, M.; BOURRET, Y. & ALFARO, G. 1982. Geología de la Isla Quiriquina. Congreso Geológico Chileno N° 3. Actas 3: 307-338. Concepción.
- GALLI, C. 1967. Geología Urbana y suelo de fundación de Concepción y Talcahuano, Chile. Informe final del Proyecto de Investigación N° 75 de la Comisión de Investigación Científica de la Universidad de Concepción (Inédito). 248 pp. Concepción.
- GANOR, J.; LU, P.; ZHENG, Z. & ZHUN, C. 2007. Bridging the gap between laboratory measurements and field estimations of silicate weathering using simple calculations. *Environmental Earth Sciences*. Vol. **53**:599-610.

- GARCÍA, Y. 2004. Aplicación de los métodos círculo de Mohr y programa ReActiva 2.4, en el análisis de stress en las estructuras mayores de la ciudad de Concepción, VIII Región del Bío-Bío, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 119 pp. Concepción.
- GEOLOGÍA DE CAMPO II. 2019. Geología del sector norte de la provincia de Concepción entre los 36°31' – 36°50' latitud sur y 72°55' – 73°13' longitud oeste, región del Biobío, Chile. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 192 pp. Concepción.
- GLODNY, J.; ECHTLER, H.; COLLAO, S.; ARDILES, M.; BURÓN, P. y FIGUEROA, O. 2008. Differential Late Paleozoic active margin evolution in South-Central Chile (37°-40°S) The Lanahue Fault Zone. *Journal of South American Earth Sciences*. Vol. **26**: 397-411. Oxford.
- GLODNY, J.; LOHRMANN, J.; ECHTLER, H.; GRÄFE, K.; SEIFERT, W.; COLLAO, S. & FIGUEROA, O. 2005. Internal dynamics of a paleoaccretionary wedge: insights from combined isotope tectonochronology and sandbox modelling of the South-Central Chilean forearc. *Earth and Planetary Science Letters*. Vol. **231** N° 1-2: 23-39. Potsdam.
- GOLDICH, S. 1938. A study in rock-weathering. *The Journal of Geology*. Vol. **46**: 17-58.
- GONZALEZ, M., 2017. Una aproximación al producto mineralógico del ambiente edáfico por la acción de los elementos climáticos. *Terra. Nueva Etapa, XXXIII*. Vol. **54**: 189-205.
- HEILMAYR, R.; A, B, ECHEVERRÍA, C.; FUENTES, R. & LAMBIN, E. 2016. A plantation-dominated forest transition in Chile. *Applied Geography*. Vol. **75**: 71-82.
- HERVÉ, F. (1977): Petrology of the Crystalline Basement of the Nahuelbuta Mountains, South Central Chile. En: Comparative studies on the geology of the Circum-Pacific Orogenic Belt in Japan and Chile, editado por T. Ishikawa and L. Aguirre. Japan Society for the promotion of Science, Tokyo. 1-51.
- HERVÉ, F. 1988. Late Paleozoic subduction and accretion in Southern Chile. Episodes *Journal of International Geoscience*. Vol. **11** (3): 183-188. París.
- HERVÉ, F.; CALDERÓN, M.; FANNING, C.M.; PANKHURST, R.J. & GODOY, E. 2013. Provenance variations in the Late Paleozoic accretionary complex of central Chile as indicated by detrital zircons. *Gondwana Research*. Vol. **23**: 1.122-1.135.
- HERVÉ, F.; DAVIDSON, J.; GODOY, E.; MPODOZIS C. & COVACEVICH V. 1981. The late Paleozoic in Chile: stratigraphy, structure and possible tectonic framework. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*. Vol. **53** (2): 361-373. Río de Janeiro.

- HERVÉ, F.; FAÚNDEZ, V.; CALDERÓN, M.; MASSONE, H.J. & WILLNER, A.P. 2007. Metamorphic and plutonic basement complexes. In Moreno, T. y Gibbons, W. (Eds). *The Geology of Chile. Spec. Vol. Geol. Soc.*: 5-19. Londres.
- HERVÉ, F.; GODOY, E.; PARADA, M.A.; RAMOS, V.; RAPELA, C.; MPODOZIS, C. & DAVIDSON, J. 1987. A general view on the Chilean-Argentine Andes, with emphasis on their early history. *Circum-Pacific Orogenic Belts and Evolution of the Pacific Ocean Basin* (Monger, J.W.H. y Francheteau, J. editores). American Geophysical Union: 97-113. Michigan.
- HERVÉ, F.; MUNIZAGA, F.; MANTOVANI, M. & HERVÉ, M., 1976. Edades Rb/Sr neopaleozoicas del basamento cristalino de la Cordillera de Nahuelbuta. Congreso geológico Chileno N°1. 19-26. Santiago.
- HOUGHTON RA, J.; HACKLER & LAWRENCE, K. 1999. The US carbon budget: Contributions from land-use change. *Science*. Vol. **285**: 574-578.
- HU, G. & BALASUBRAMANIAN, R., 2003. Wet deposition of trace metals in Singapore. *Water, Air, and Soil Pollution*. Vol **144**: 285-300.
- HUBER, A.; IROUMÉ, A.; MOHR, C. & FRÊNE, C. 2010. Efecto de plantaciones de *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* sobre el recurso agua en la Cordillera de la Costa de la región del Biobío, Chile. *Bosque*. Vol. **31**, (3): 219-230. Valdivia.
- HÜSEYİN, S.; TULAY, T. & ORHAN, D. 2018. Geochemical mass balance applied to the study of weathering and evolution of soils. *Indian Journal of Geo Marine Sciences*. Vol. **47**: 1851-1865.
- INDAMA. (s/f). Patrimonioindustrialbiobio.Cl. Recuperado el 31 de octubre de 2023, de <https://patrimonioindustrialbiobio.cl/indama/>
- INFOR (Instituto Forestal, CL). 2019. Anuario Forestal 2019. Boletín Estadístico 168. Centro de Información Forestal, sede Metropolitana, Santiago, Chile. 232 pp.
- INOSTROZA, A. 2018. Discusión estratigráfica de las formaciones Quiriquina, Pilpilco, Curanilahue, Cosmito y Cerro Alto de la Provincia de Concepción y Norte de la Provincia de Arauco. Región del Biobío, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 124 pp. Concepción.

- JAQUE, E., 1996. Análisis integrado de los sistemas naturales de la cuenca del río Andalién: bases para la planificación ecológica del territorio de la cuenca. Tesis doctoral, 123 pp.
- JENNY, H., 1994. Factors of soil formation: A system of quantitative pedology. Dover Publications, INC.: 271 pp. New York.
- JONES, M.; R.; LACROIX, R.; ZEIGLER, J.; YING, S.; NICO, P. & KEILUWEIT, M. 2020. Enzymes, manganese, or iron? Drivers of Oxidative Organic matter decomposition in soils. *Environ. Sci. Technol.* Vol. **54**: 14114–14123
- KAMANI, H.; HOSEINI, M.; SAFARI, G.; JAAFARI, J. & MAHVI, A., 2014. Study of trace elements in wet atmospheric precipitation in Tehran, Irán. *Environ Monit Assess.* Vol. **186**: 5059-5067.
- LAMBIN, E.; TURNER, B.; GEIST, H.; AGBOLA, S.; ANGELSEN, A. 2001. The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions.* Vol. **11**: 261-269.
- LI, H.; SANTOS, F.; BUTLER, K. & HERNDON, E., 2021. A Critical Review on the Multiple Roles of Manganese in Stabilizing and Destabilizing Soil Organic Matter. *Environmental Science & Technology.* Vol. **55**: 12136-12152.
- LING, S.; WU, X.; ZHAO, S.; LIAO, X.; REN, Y. & ZHU, B. 2014. Geochemical mass balance and elemental transport during the weathering of the black shale of Shuijingtuo Formation in northeast Chongqing, China. *The scientific world journal.* Vol. **2014**, Article ID 742950, 13 pp.
- LÓPEZ, V.; BALDERAS, M.; CHÁVEZ, M.; PÉREZ, J. & GUTIÉRREZ, J. 2015. Cambio de uso de suelo e implicaciones socioeconómicas en un área mazahua del altiplano mexicano. *Ciencia Ergo Sum.* Vol. **22**, (2): 136-144. Toluca
- MILLALEO, R.; REYES-DÍAZ, M.; IVANOV, A.; MORA, M. & ALBERDI, M., 2010. Manganese as essential and toxic element for plants: Transport, accumulation and resistance mechanisms. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition.* Vol. **4**: 476-494.
- MIYASHIRO, A. 1961. Evolution of Metamorphic Belts. *Journal of Petrology.* Vol. **2**: 277-311.
- MEDIAVILLA, A. 2014. Meteorización química. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra. Edición digital: 230-238.

- MUÑOZ CRISTI, J. 1956. Handbook of South American Geology. *The Geological Society of America*. Vol. **65**: 187-214. Santiago.
- MUÑOZ, V. 2007. El basamento metamórfico paleozoico, serie occidental en la hoja Queule, IX y X Región, Chile: condiciones presión-temperatura del metamorfismo. Tesis para optar al Grado de Magíster en Ciencias. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (Inédito): 183 pp. Santiago.
- NAHUELHUAL, L.; CARMONA, A.; LARA, A.; ECHEVERRÍA, C. & GONZÁLEZ, M. 2012. Land-cover change to forest plantations: Proximate causes and implications for the landscape in south central Chile. *Landscape and Urban Planning*. Vol. **107**: 12-20.
- NESBIT, H.; MARKOVICS, G. & PRICE, V. 1980. Chemical processes affecting alkalis and alkaline earths during continental weathering. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol. **44**: 1659-1666
- NESBIT, H. & YOUNG, G. 1984. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol.**48**: 1523-1534.
- NESBIT, H. & YOUNG, G. 1989. Formation and diagenesis of weathering profiles. *The Journal of Geology*. Vol. **97**: 129-147.
- NIELSEN, S. & GLODNY, J. 2009. Early Miocene subtropical water temperatures in the southeast Pacific. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*. Vol. **280**: 480–488.
- PÉREZ-BARRÍA, L.P. 2004. Estudio taxonómico de la fauna de invertebrados del Triásico del Biobío (VIII Región, Chile): una aproximación preliminar. *Ameghiniana*. Vol. **41** (4): 18. Buenos Aires.
- PINEDA, V. 1983. Evolución Paleogeográfica de la Península de Arauco durante el Cretácico Superior-Terciario. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología y Geofísica (Inédito): 278 pp. Santiago.
- PRESTRUD, S.; VON BLANKENBURG, F. & WHITE, F., 2007. Physical and chemical controls on the critical zone. *Elements*. Vol. **3**: 315-319.
- QUAN, Q.; WANG, C.; HE, N.; ZHANG, Z.; WEN, X.; SU, H.; WANG, Q. & XUE, J. 2014. Forest type affects the coupled relationships of soil C and N mineralization in the temperate forests of northern Chile. *Scientific Reports*. Vol. **4**. 6584.

- QUEZADA, J. 1996. Geología urbana y ambiental de la ciudad de Concepción. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra (Inédito): 143 pp., Concepción.
- QUIDEAU, S., CHADWICK, O., BENESI, A., GRAHAM, R., & ANDERSON, M. 2001. A direct link between forest vegetation type and soil organic matter composition. *Geoderma*. Vol. **104**(1-2): 41-60.
- RAMANKUTTY, N. & FOLEY, J. 1999. Estimating historical changes in global land cover: Croplands from 1700 to 1992. *Global Biogeochemical Cycles*. Vol. **13**, (4): 997-1027. Madison.
- RAMÍREZ, P., 2004. Estudio geológico ambiental de la cuenca del estero Nonguén. Universidad de Concepción, Concepción.
- RANKAMA, K. & SAHAMA, T., 1950. Geochemistry. The University of Chicago Press: 912 pp.
- REIMANN, C., FILZMOSE, P., GARRETT, R., DUTTER, R. 2008. Statistical data analysis explained. Applied Environmental Statistics. R. Wiley, Chichester.
- ROJAS, C. 2000. Edad y Paleoecología de la Secuencia Basal de la Formación Tubul: Plioceno de Arauco, Mediante el Análisis de Foraminíferos. Memoria para optar al Título de Biólogo Marino. Universidad de Concepción, Departamento de Oceanografía (Inédito): 109 pp. Concepción.
- SADSAWKA, A.; PERALTA, M.; IBARRA, M.; PERALTA, J. & FUENTES, J., 1995. Características químicas de suelos forestales chilenos. *Bosque*. N° 16. Vol. **1**: 9-28.
- SALAZAR, C.; STINNESBECK, W. & QUINZIO-SINN, L.A. 2010. Ammonites from the Maastrichtian (Upper Cretaceous) Quiriquina Formation in central Chile. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie-Abhandlungen*. Vol. **257** (2): 181-236. Stuttgart.
- SANTA REGINA, I.; GALLARDO, J.; SAN MIGUEL, C. & MOYANO, A., 1989. Intercepción, pluvio lavado y escorrentía cortical en una plantación de *Pinus sylvestris* de la Cuenca de Candelario (centro-oeste de España). *Bosque*. N°10. Vol. **1**: 19-27.
- SCHLATTER, J. & OTERO, L., 1995. Efecto del *Pinus radiata* sobre las características químico-nutritivas del suelo mineral superficial. *Bosque*. N°16. Vol. **1**: 29-46.

- SCHLATTER, J., 1977. La relación entre suelo y plantaciones de *Pinus radiata* D. Don en Chile central análisis de la situación actual y planteamientos para su futuro manejo. *Bosque*. N° 1. Vol. 2: 12-31.
- SCHOENEBERGER, P.J., D.A. WYSOCKI, E.C. BENHAM, & SOIL SURVEY STAFF. 2012. Field book for describing and sampling soils, Version 3.0. Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, NE.
- STANLEY, C., LAWIE, D. 2007. Average relative error in geochemical determinations: Clarification, calculation, and a plea for consistency. *Exploration and Mining Geology*. Vol.16(3-4): 267-275.
- STRHALER, A. 1992. Geología Física. Editorial Omega S.A. Barcelona. España. 627pp.
- STRECKEISEN, A. L. 1967. Classification and Nomenclature of Igneous Rocks. *Neucs Juhrhuch firer Minerulogie Ahhundlungen*. Vol. 107.
- SURYAWANSHI, P.; RAJARAM, B.; BHANARKA, R. A. & RAO, C. 2016. Determining heavy metal contamination of road dust in Delhi, India. *Atmósfera*. Vol. 29(3): 221–234.
- TAVERA, J. 1942. Contribución al estudio de la estratigrafía y Paleontología del Terciario de Arauco. Congreso Panamericano de Ingeniería de Minas y Geología N° 1. Vol 2: 580-632. Santiago.
- VITOUSEK, P.; MOONEY, H.; LUBCHENCO, J. & MELILLO, J. 1997. Human Domination of Earth's Ecosystems. *Science*. Vol. 277: 494-499.
- VORONEY, R. 2007. 2 – The soil habitat. Soil Microbiology, ecology, and Biochemistry (Third Edition). Eldor, P editor. Academic Press. 25-49.
- WANG, Y.; CHENG, K.; WEIDONG, W.; HEZHONG, T.; PENG, Y.; GUORUI, Z.; JING, F.; SHUHAN, L. 2017. Atmospheric emissions of typical toxic heavy metals from open burning of municipal solid waste in China. *Atmospheric Environment*. Vol.152: 6-15.
- WHITE, A. 1995. Chemical weathering rates of silicate minerals in solis. *Reviews in mineralogy and geochemistry*. Vol. 31: 407-461.
- WHITE, A.; BLUM, A.; SCHULZ, M.; VIVIT, D.; STONESTROM, D.; LARSEN, M.; MURPHY, S. & EBERL, D., 1998. Chemical weathering in a tropical watershed, Luquillo

Mountains, Puerto Rico: I. Long-term versus short-term weathering fluxes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol. **62**: 209-226.

WHITE, A. & BUSS, H. 2013. Natural weathering rates of silicate minerals. *Treatise on Geochemistry* 2nd Edition. Holland, H. y Turekian, K. Editores. Elsevier. Vol.5: 133-168.

WILLNER, A. P.; THOMSON, S. N.; KRÖNER, A.; WARTHÖ, J. A.; WIJBRANS, J. & HERVÉ, F. 2005. Time markers for the evolution and exhumation history of a late Palaeozoic paired metamorphic belt in central Chile (34°– 35° 30'S). *Journal of Petrology*. Vol. **46** (9): 1.835–1.858.

YOO, K., 2017. Soil mass balance. University of Minnesota, USA. 5 pp.

ANEXO A
METODOLOGÍA

1. Fichas descripción física in situ de los perfiles de suelo.

HOJA DE CAMPO PARA DESCRIPCIÓN DE CARACTERÍSTICAS DE PERFIL DE SUELO		SUELOS FORERSTALES GEOMORFOLOGÍA Y SUELOS		UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN											
LANDFORM: Cordillera de la Costa				FECHA: 22 octubre del 2021											
NOMBRE SITIO: Parque Nacional Nonguén		COORDENADAS: 678854/5915798		259 m s.n.m CALICATA: NOBN1 (original)											
POSICIÓN PENDIENTE: Alta ladera		PENDIENTE:		VEGETACIÓN: Roble											
PROF (cm)	LÍMITE	COLOR			TEXTURA	ARCILLA %	ESTRUCTURA	CONSISTENCIA				CLAY FILMS	RAÍCES	POROS	FRAG. ROCA %
		SECO	H	V				C	S	H	A				
0 - 9	SC	SECO					sbk m1, f1 granular					-	vf3, f3, m2 c2, vc2	intersticial vf2, f2	10
9 - 33	SG	HÚMEDO					sbk m2, f2, vf2					-	vf3, f2, m2 c2, vc1	vf3, f3, m2	8
33 - 62	SC	SECO					sbk m2, f2, vf2					cutanes	vf3, f2, m2 c1, vc1	vf3, f3, m2 c1	5
62 - 81	SC	HÚMEDO					abk c1, m2, f2, vf1					cutanes ++	vf3, f2, m1, c1, vc1	vf3, f3, m2	25
81 - 93	WC	SECO					abk c1, m2, f2, vf2 sbk f2, vf2					cutanes ++	vf3, f2, m1 c1	vf3, f3, m2 c1	3
93 - 154	WC	HÚMEDO					sbk c1, m2, f2					cutanes +	vf2, f2, m2 c1	vf2, f2, m1	35
154 - 172	-	SECO					abk m2, f2, vf1 sbk f1, vf1					cutanes ++	f1, m1	vf2, f1	3
OBSERVACIONES:		62 - 81 → Horizonte clástico; nivel conglomerádico de clastos sbk a subredondeado con tamaño ≤4cm. 93 - 154 → Horizonte clástico; clastos abk → sbk ≤15cm, moda 5-7 cm, visualmente densidad aparente menor al resto del perfil (contrastar con lab). 154 - 172 → Trazas de carbón.													

HOJA DE CAMPO PARA DESCRIPCIÓN DE CARACTERÍSTICAS DE PERFIL DE SUELO		SUELOS FORERSTALES GEOMORFOLOGÍA Y SUELOS		UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN											
LANDFORM: Cordillera de la Costa				FECHA: 28 octubre del 2021											
NOMBRE SITIO: Parque Nacional Nonguén		COORDENADAS: 678874/5915565		251 m s.n.m CALICATA: NOBN2											
POSICIÓN PENDIENTE: Alta ladera		PENDIENTE:		VEGETACIÓN: Roble, Quila											
PROF (cm)	LÍMITE	COLOR			TEXTURA	ARCILLA %	ESTRUCTURA	CONSISTENCIA				CLAY FILMS	RAÍCES	POROS	FRAG. ROCA %
		SECO	H	V				C	S	H	A				
0 - 9	SC	SECO					sbk: c1, m2, f2 gr: f2, vf2						vf3, f3, m2, c1, vc1	vf3, f1 M1	2
9 - 39	WC	HÚMEDO					Sbk: c2, m1 f2, vf1					cutanes (-)	vf3, f3, m3, c2, vc1	vf3, f3 M2	8
39 - 61	SC	SECO					Sbk: m2, f2 vf2					cutanes (-)	vf3, f2, m1, c1	vf3, f2 M1	15
61 - 97	WG	HÚMEDO					Abk: co2, m2, f2 vf2					cutanes (++)	vf1, f1, m1	vf3, f2 M2	18
97 - 121	WG	SECO					Abk: vc1, c2 M1, f2, vf1					cutanes (+)	vf1, f1, m1	vf2, f2, m1	10
121 - 150	IG	HÚMEDO					Abk: c1, m1 F2, vf1					cutanes (+)	F1-----	vf3, f2, m1	15
150 - 170	-	SECO					Abk: c1, m1 F1					cutanes (-)	F1-----		5
OBSERVACIONES:		150-170: se observa moteado de óxidos de Fe irregulares (poca abundancia), cutanes se localizan preferentemente en moteados de óxidos de Fe. Además, pequeños moteados diseminados de Fe-Mn (poca abundancia). → Perfil general con horizontes diagonales (nohorizontales-> ver dibujo). Entre 97-121 y 121-150 se observan masas de óxidos de Mn, irregulares y moderadamente abundantes.													

HOJA DE CAMPO PARA DESCRIPCIÓN DE CARACTERÍSTICAS DE PERFIL DE SUELO		SUELOS FORERSTALES GEOMORFOLOGÍA Y SUELOS		UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN													
LANDFORM: Cordillera de la Costa			FECHA: 15 Octubre del 2021														
NOMBRE SITIO: Parque Nacional Nonguén		COORDENADAS: 678798/5915587	- m s.n.m	CALICATA: NOBN3													
POSICIÓN PENDIENTE: Ladera alta		PENDIENTE: 17°		VEGETACIÓN: Roble, Peumo, Avellano, Boldo, Arrallán, Olivilla, Quila, Helechos, Lingue													
PROF (cm)	LÍMITE	COLOR				TEXTURA	ARCILLA %	ESTRUCTURA	CONSISTENCIA				CLAY FILMS	RAÍCES	POROS	FRAG. ROCA %	
		SECO	HÚMEDO	H	V				C	MOJADO							
									S	H	A	P					
Oi	0 - 2	SC	SECO					Gr: f2, vf2						-	Vf2, f2	Vf: 3 intersticial	3
			HÚMEDO														
A1	2 - 12	SG	SECO					Sbk: f2, m2 vf1 gr: vf2						-	Vf2, f2 M2, c1, vc1	Vf2, f2 M2,-	3
			HÚMEDO														
A2	12 - 23	SG	SECO					Abk: m2, f2 Sbk: m1, f2, vf2						-	Vf2, f2 M2, c2, vc1	Vf2, f2 M1-	7
			HÚMEDO														
AB	23 - 37	SC	SECO					Abk: m2, f2 Sbk: m1, f2, vf2						-	Vf2, f2 M3, c1, vc1	Vf2, f2 M2	1
			HÚMEDO														
B1	37 - 64	SG	SECO					Abk: m2 Sbk: f2, vf2						Cutanes	Vf1, f2 M2, c2, vc1	Vf2, f2 M2	6
			HÚMEDO														
B2	64 - 94	WC	SECO					Abk: m2 Sbk: f2, vf2						Cutanes -	Vf1, f1 M2, c1	Vf2, f2 M2, c1	8
			HÚMEDO														
B3	94 - 125	WG	SECO					Abk: m1 Sbk: f2, vf2						Cutanes	Vf1, f1 M1, c1	Vf2, f2 M2	15
			HÚMEDO														
BCv	125 - 146	WC	SECO					Abk: m2 Sbk: f2, vf2						Cutanes +	Vf1, f1 M2, c1	Vf2, f2 M2	0
			HÚMEDO														
Cv	146 - 165	WC	SECO					masivo						-	Vf1, f2	Vf3, f2	-
			HÚMEDO														
OBSERVACIONES:		H A1: trozos de carbón? (¿?) también en Bz y AB H Cr: poros interstitial (intersticiales) H Oi: poros intersticiales															

HOJA DE CAMPO PARA DESCRIPCIÓN DE CARACTERÍSTICAS DE PERFIL DE SUELO		SUELOS FORERSTALES GEOMORFOLOGÍA Y SUELOS		UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN													
LANDFORM: Cordillera de la Costa			FECHA: 20 octubre de 2021														
NOMBRE SITIO: Parque Nacional Nonguén		COORDENADAS: 678991/5915203	248 m s.n.m	CALICATA: NOBN4													
POSICIÓN PENDIENTE: Alta ladera		PENDIENTE:		VEGETACIÓN: Roble, Canelo, Mañío													
PROF (cm)	LÍMITE	COLOR				TEXTURA	ARCILLA %	ESTRUCTURA	CONSISTENCIA				CLAY FILMS	RAÍCES	POROS	FRAG. ROCA %	
		SECO	HÚMEDO	H	V				C	MOJADO							
									S	H	A	P					
	0 - 7	SC	SECO					Sbk: m1, f2, vf2							Vf3, f3 M2, c1, vc2	Vf3, f2, m2, c1	2
			HÚMEDO														
	7 - 19	SG	SECO					Sbk: m1, f2, vf2							Vf3, f2 M2, c1, vc1	Vf3, f2 M2, c1	-
			HÚMEDO														
	19 - 31	SG	SECO					Sbk: m2, f2, vf2						Cutanes (-)	Vf3, f3 M2, c2, vc1	Vf3, f3, m2, c1	2
			HÚMEDO														
	31 - 49	SC	SECO					Sbk, c1, m2, m2, f2, vf2						Cutanes (-)	Vf3, f2 M2, c2, vc1	Vf3, f3 M2	10
			HÚMEDO														
	49 - 85	SC	SECO					Abk: c1, m2 Sbk: m2, f2, vf2						Cutanes (+)	Vf3, f2 M1, c1, vc1	Vf3, f3 M2	5
			HÚMEDO														
	85 - 96	WC	SECO					Abk: c2, m1 Sbk: m2, f2, vf2						Cutanes	Vf1, f2 M1	Vf3, f2 M2	8
			HÚMEDO														
	96 - 128	WC	SECO					Abk: c2, m2 Sbk: m2, f2, vf2						Cutanes (++)	Vf1, f1 m1	Vf2, f1 M1	20
			HÚMEDO														
	128 - 139	SC	SECO					Abk: m2, f2						Cutanes (++)	F1	Vf2, f1	40
			HÚMEDO														
	139 - 162	-	SECO					Masivo						Cutanes (-)	-	Vf2	40
			HÚMEDO														
OBSERVACIONES:		139-162→ moteado irregular "intenso Fe/Mn"; 128-139→ Clastos menos alterados y elevada coloración roja, escaso moteado Fe/Mn, capa horizontal de clastos; 96-128→ Intenso moteado irregular ox Fe, muy escaso moteado de ox de Mn; 31-43→ clastos redondeados de $\theta \leq 4\text{cm}$; 128-139→ clastos alterados a caolinita (alteración hidrotermal); Alteración óxidos de Fe-Mn en masas (< very weakly cemented) formas levemente esféricas a irregulares alargadas, con buena a moderada cristalinidad; 139-162→ concentración en láminas de ox de Fe-Mn, arcillas (blancas) y óxidos de Fe (rojos) de distribución horizontal en el perfil.															

HOJA DE CAMPO PARA DESCRIPCIÓN DE CARACTERÍSTICAS DE PERFIL DE SUELO

SUELOS FORERSTALES
GEOMORFOLOGÍA Y SUELOS

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

LANDFORM: Cordillera de la Costa						FECHA: 21 / oct / 2021	
NOMBRE SITIO: Parque Nacional Nonguén			COORDENADAS: 678855 / 5915909		250 m s.n.m	CALICATA: NOPL1 (original)	
POSICIÓN PENDIENTE: Alta ladera			PENDIENTE:		VEGETACIÓN: Pinos (plantación)		

PROF (cm)	LÍMITE	COLOR			TEXTURA	ARCILLA %	ESTRUCTURA	CONSISTENCIA				CLAY FILMS	RAÍCES	POROS	FRAG. ROCA %	
		SECO	H	V				C	S	H	A					P
0-9	SC	SECO					sbk: co1, m2, f2, vf2						-	vf3; f3; m2	vf3; f3; m2	-
		HÚMEDO														
9-19	SG	SECO					abk: co2, m2 sbk: m1, f2, vf2						-	vf3; f2; m2 c1	vf3, f3, m2	1
		HÚMEDO														
19-30	SG	SECO					abk: co1, m2, f2, vf1 sbk: m1, vf2						-	vf2, f2, m2 c1 -	vf3, f3	-
		HÚMEDO														
30-66	WG	SECO					abk: co2, m2, f2, vf2						cutanes (-)	vf2, f1, m1 c1	vf3, f3, m2, c1	12
		HÚMEDO														
66-85	WC	SECO					abk: co2, m2, f1, vf1						cutanes	vf1, f1 -	vf3, f3 -	2
		HÚMEDO														
85-124	WC	SECO					abk: m2, f2						cutanes (+)	f1 -	vf3, f3, m2	3
		HÚMEDO														
124-163	WC	SECO					Masivo						cutanes (+)	f1 -	vf3, f3 -	-
		HÚMEDO														
163-174	-	SECO					Masivo						cutanes (+)	c1 -	vf3, f3	-
		HÚMEDO														

OBSERVACIONES: 30-66: últimos 10 cm se observa una alta concentración de clastos redondeados $\phi \leq 10$ cm que generan alta porosidad en el suelo "podría ser otro horizonte"; 19-30: presencia de carbón; 30 - 66: poros de 5- 10 mm (grande) en capa de clastos (conglomerado); 85 - 124: moteados irregulares y alargados verticalmente de óxidos de Fe (rojos) (foto), se observa alto contenido de mica (quizás alterada porque está muy blanda); 124 - 163: moteado irregular de óxidos de Fe-Mn en baja proporción; 163 - 174: moteado irregular de óxido de Fe (rojos) y óxidos de Fe-Mn diseminado, locales (solo en algunos sectores).

HOJA DE CAMPO PARA DESCRIPCIÓN DE CARACTERÍSTICAS DE PERFIL DE SUELO

SUELOS FORERSTALES
GEOMORFOLOGÍA Y SUELOS

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

LANDFORM: Cordillera de la Costa						FECHA: 14 / oct / 2021	
NOMBRE SITIO: Parque Nacional Nonguén			COORDENADAS: 678955 / 5916078		250 m s.n.m	CALICATA: NOPL2 (NOPL-N1)	
POSICIÓN PENDIENTE: Alta a media ladera			PENDIENTE: 22°		VEGETACIÓN: Pinos (plantación)		

PROF (cm)	LÍMITE	COLOR			TEXTURA	ARCILLA %	ESTRUCTURA	CONSISTENCIA				CLAY FILMS	RAÍCES	POROS	FRAG. ROCA %	
		SECO	H	V				C	S	H	A					P
0-6	SC	SECO					gr, vf2, f3, m1 sbk, f2, m1							vf2, f2 m1, c1	vf3, f2 -	0
		HÚMEDO														
6-36	WC	SECO					sbk, f1, m1 -							vf1, f1 m1 -	vf2, f1 m1	2
		HÚMEDO														
36-62	SG	SECO					cutanes -	abk, m2, co1 f1 -					cutanes -	vf1, f1 m1 -	vf2, f2 -	5
		HÚMEDO														
62-95	WC	SECO					cutanes	abk, f2, vf2 m1 -					cutanes	vf1, f1 -	vf2, f1 -	2
		HÚMEDO														
95-132	WC	SECO					cutanes +	abk, m2, f2 vf2 -					cutanes +	vf1, f1 -	vf2, f1 -	35
		HÚMEDO														
132-147	SC	SECO					cutanes ++	abk, m2, f2, vf1					cutanes ++	-	vf2 f1	13
		HÚMEDO														
147-172	-	SECO					cutanes ++	abk, m2, f2 -					cutanes ++	-	vf1 -	8
		HÚMEDO														

OBSERVACIONES: En general en el perfil no se ven estructuras, excepto en horizonte A1 (0-6); h3 (36-62) se observan finos trozos de carbón, también en h4 (62-95); h5 (95-132) nivel conglomerádico matriz soportado, clastos redondeados a subangulares de 10 cm a menores muy meteorizados; h6 (132-147) nivel con clastos de 2 cm a menores muy meteorizados y presencia de carbón.

HOJA DE CAMPO PARA DESCRIPCIÓN DE CARACTERÍSTICAS DE PERFIL DE SUELO				SUELOS FORERSTALES GEOMORFOLOGÍA Y SUELOS				UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN								
LANDFORM: Cordillera de la Costa							FECHA: 12 / oct / 2021									
NOMBRE SITIO: Parque Nacional Nonguén				COORDENADAS: 678919 / 5916080		249 m s.n.m		CALICATA: NOPL 3 (NOPL N2)								
POSICIÓN PENDIENTE: Alta ladera				PENDIENTE: 17°		VEGETACIÓN: Pinos (plantación)										
PROF (cm)	LÍMITE	COLOR				TEXTURA	ARCILLA %	ESTRUCTURA	CONSISTENCIA				CLAY FILMS	RAÍCES	POROS	FRAG. ROCA %
		SECO	H	V	C				S	H	MOJADO					
										A	P					
0-9	WG	SECO					3	sbk, vf1, f2, m2 abk f1					-	vf2, f2 m1	vf2, f2 m1	-
9-24	WC	HÚMEDO					2	sbk, vf1, f2, m2					-	vf2, f2 m1, c1	vf2, f2 m1, c1	10
24-44	SC	SECO					5	sbk f2, m2					cutanes =	vf2, f2 m1	vf2, f2 m2	≈ 30
44-66	WC	HÚMEDO					15	abk m2, CO2 f1					cutanes =	vf2, f2 m1	vf2, f2 m2	25
66-83	WG	SECO					8	sbk m2, f2 abk m2, f2					cutanes (-)	vf2, f2 m1	vf2, f2 m2	20
83-94	WG	HÚMEDO					5	abk f2, m2						vf2, f1 m2	vf2, f2 m1	30
94-107	WG	SECO					10	abk f2, m2					cutanes	vf1, f2 m1	vf2, f2 m2	15
107-125	WG	HÚMEDO					5	abk m2, c2, f1					cutanes Bien formados	vf1, f2 c1	vf2, f1 m2	20
125-135	SG	SECO					10	abk m2, c2					cutanes (+)	vf1, f2 c1	vf2, f2 m2	5
135-157	SC	HÚMEDO					8	abk m2, c2					cutanes (+)	f1, c1	vf1, f1	0
157-	SA	SECO					2									
OBSERVACIONES:		3 cm de ¿martillo? Oi/1 cm de Oe/1 cm de Oa; 83 - 94: mucha mica; 94 - 107: mas arena; 125 - 135: cambio de color más rojo, óxido de Fe y Mn; 135 - 157: hematita; 157: sin estructura, masivo, no es roca (no saprolito).														

HOJA DE CAMPO PARA DESCRIPCIÓN DE CARACTERÍSTICAS DE PERFIL DE SUELO				SUELOS FORERSTALES GEOMORFOLOGÍA Y SUELOS				UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN								
LANDFORM: Cordillera de la Costa							FECHA: 19 / oct / 2021									
NOMBRE SITIO: Parque Nacional Nonguén				COORDENADAS: 679027 / 5915926		233 m s.n.m		CALICATA: NOPL4								
POSICIÓN PENDIENTE: Media ladera				PENDIENTE:		VEGETACIÓN: Plantación con pinos, más nativos										
PROF (cm)	LÍMITE	COLOR				TEXTURA	ARCILLA %	ESTRUCTURA	CONSISTENCIA				CLAY FILMS	RAÍCES	POROS	FRAG. ROCA %
		SECO	H	V	C				S	H	MOJADO					
										A	P					
0-3	SC	SECO						sbk: f2, vf2 gr: vf2					-	vf2, f2 m2, c2 vc2	IR	3
3-9	SC	HÚMEDO						sbk: co1, f2, vf2 abk: m2, f2, vf2					-	vf2, f2 m2, c1	m2, f2 vf2	5
9-30	WC	SECO						abk: m2, f2 sbk: m1, f2, vf2					-	vf2, f2 m1, c1	vf: 2 f2	8
30-55	WC	HÚMEDO						sbk: m2, f2 vf2					cutanes (-)	vf2, f2 -	vf2 f1	18
55-81	WG	SECO						abk: m1 sbk: m2, f2 vf: 1					cutanes	vf2 f1	vf2 f1	35
81-99	WC	HÚMEDO						sbk: co1, m2 f2, vf1					cutanes (-)	vf2 f2	vf2 f1	35
99-112	IC	SECO						sbk: m2, f2 vf:1					cutanes (-)	vf2 f1	vf2 f1, m1	5
112-143	WC	HÚMEDO						sbk: m2 f1, vf1						vf2 f1	f1 vf2	40
143-162	-	SECO						m (masivo)					-	vf1 f1	IR	-
OBSERVACIONES:		0 - 3: poros intersticiales; 112 - 143: clastos grandes con suelo en intersticios (parece un horizonte C, pero hay clastos con vertices redondeados).														

3. Tabla muestras estándar (STD).

Muestras estándar (STD)	SiO2 (ppm)	Al2O3 (ppm)	Fe2O3(T) (ppm)	MnO (ppm)	MgO (ppm)	CaO (ppm)	Na2O (ppm)	K2O (ppm)	TiO2 (ppm)	P2O5 (ppm)	V (ppm)	Cr (ppm)	Co (ppm)	Cu (ppm)	Zn (ppm)	Zr (ppm)	Pb (ppm)	As (ppm)
NIST 694 Meas	104700	18200	7800	120	3400	429300	8600	5300	1110	304000	1690	-	-	-	-	-	-	-
NIST 694 Cert	112000	18000	7900	116	3300	436000	8600	5100	1100	302000	1740	-	-	-	-	-	-	-
GBW 07113 Meas	692500	127300	32200	1370	1500	5900	24600	53400	2870	500	< 5	-	-	-	-	392	-	-
GBW 07113 Cert	728000	130000	32100	1400	1600	5900	25700	54300	3000	500	5	-	-	-	-	403	-	-
SY-4 Meas	500000	201100	60500	1030	5200	78900	69500	16600	2910	1300	6	-	-	-	-	523	-	-
SY-4 Cert	499000	206900	62100	1080	5400	80500	71000	16600	2870	1310	8	-	-	-	-	517	-	-
BIR-1a Meas	482600	155100	110500	1660	96800	133900	18300	300	9830	200	325	390	51	130	70	16	2.5	-
BIR-1a Cert	479600	155000	113000	1750	97000	133000	18200	300	9600	210	310	370	52	125	70	18	3	-
ZW-C Meas	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1040	-	82	-
ZW-C Cert	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1050	-	80	-
OREAS 101b (Fusion) Meas	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	45	410	-	-	-	-
OREAS 101b (Fusion) Cert	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	47	420	-	-	-	-
NCS DC86318 Meas	692900	139000	23700	580	800	4700	6000	56700	1790	300	-	-	-	-	-	-	-	-
NCS DC86318 Cert	669000	142600	22400	520	1100	2900	6600	55200	1700	200	-	-	-	-	-	-	-	-
USZ 25-2006 Meas	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	650	-	1010	-
USZ 25-2006 Cert	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	600	-	1100	-
USZ 44-2007 Meas	725600	106900	-	-	-	20300	32800	36500	2960	-	-	-	-	-	-	> 10000	-	-
USZ 44-2007 Cert	713800	109300	-	-	-	20300	34600	32000	3100	-	-	-	-	-	-	15800	-	-
DNC-1a Meas	469300	182400	96100	1430	100500	112500	19100	2200	4740	700	149	-	-	-	-	-	-	-
DNC-1a Cert	471500	183400	99700	1500	101300	114900	18900	2340	4800	700	148	-	-	-	-	-	-	-
BCR-2 Meas	549300	133200	136700	1960	37000	70500	30000	17600	22920	3300	426	-	-	-	-	177	-	-
BCR-2 Cert	541000	135000	138000	1960	35900	71200	31600	17900	22600	3500	416	-	-	-	-	188	-	-
BCR-2 Meas	547000	135900	136700	1900	35700	72600	30600	17900	22700	3700	433	-	-	-	-	189	-	-
BCR-2 Cert	541000	135000	138000	1960	35900	71200	31600	17900	22600	3500	416	-	-	-	-	188	-	-
USZ 42-2006 Meas	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	470	-	1610	225
USZ 42-2006 Cert	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	469	-	1600	224
REE-1 Meas	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	280	-	80	-	-	-	116
REE-1 Cert	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	277	-	79.7	-	-	-	124
W-2b Meas	531200	156500	107900	1600	63300	109000	22100	6200	10890	1500	271	90	44	110	80	96	9	2.5
W-2b Cert	524000	154000	107000	1630	63700	109000	21400	6260	10600	1400	262	92	43	110	80	94	9.3	1.2

4. Tabla duplicados.

Duplicados de Lab	SiO2 (%)	Al2O3 (%)	Fe2O3(T) (%)	MnO (%)	MgO (%)	CaO (%)	Na2O (%)	K2O (%)	TiO2 (%)	P2O5 (%)	V (ppm)	Cr (ppm)	Co (ppm)	Cu (ppm)	Zn (ppm)	Zr (ppm)	Pb (ppm)	As (ppm)
BN1-1 Orig	50.01	16.36	7.17	0.202	0.8	0.7	0.28	1.6	0.932	0.17	136	70	12	40	100	214	23	13
BN1-1 Dup	49.53	15.87	7.04	0.201	0.8	0.7	0.27	1.56	0.928	0.17	134	70	12	40	100	215	22	12
BN2-5 Orig	56.3	21.15	8.12	0.05	0.95	0.04	0.17	2.06	0.974	0.12	145	80	13	50	100	275	27	16
BN2-5 Dup	56.31	20.64	7.97	0.05	0.94	0.04	0.17	2.04	0.95	0.12	144	70	12	50	90	281	22	12
PL1-1 Orig	63.46	12.08	5.37	0.11	0.39	0.26	0.21	1.2	0.926	0.09	111	50	7	30	60	315	18	10
PL1-1 Dup	63.09	12.14	5.37	0.11	0.39	0.26	0.21	1.21	0.933	0.09	110	50	7	30	60	289	18	11
PL4-2 Orig	61.55	15.84	6.42	0.119	0.63	0.22	0.28	1.93	1.01	0.1	132	60	10	30	70	300	10	12
PL4-2 Dup	62.23	16.17	6.53	0.12	0.64	0.22	0.27	1.89	1.035	0.12	133	70	10	30	80	308	15	11

ANEXO B
RESULTADOS

1. Características físicas sitios bosque nativo.

PORC. SITIO	HORIZONTE	PROFUNDIDAD	NOMBRE LAB	ESTRUCTURA	CLAY FILMS	RAÍCES	POROS	FRAGMENTOS ROCOSOS	OBSERVACIONES
NOBN1_1	Oi	0-9	BN1_1	sbk m1, f1 granular	-	vf3, f3, m2 c2, vc2	intersticial vf2, f2	10	62 – 81: Horizonte clástico; nivel conglomerádico de clastos sbk a subredondeado con tamaño ≤4cm. 93 – 154: Horizonte clástico; clastos abk -> sbk ≤15cm, moda 5-7 cm, visualmente densidad aparente menor al resto del perfil (contrastar con lab). 154 – 172: Trazas de carbón.
NOBN1_2	A	9-33	BN1_2	sbk m2, f2, vf2	-	vf3, f2, m2 c2, vc1	vf3, f3, m2	8	
NOBN1_3	B1	33-62	BN1_3	sbk m2, f2, vf2	cutanes	vf3, f2, m2 c1, vc1	vf3, f3, m2 c1	5	
NOBN1_4	B2	62-81	BN1_4	abk c1, m2, f2, vf1	cutanes ++	vf3, f2, m1, c1, vc1	vf3, f3, m2	25	
NOBN1_5	B3	81-93	BN1_5	abk c1, m2, f2, vf2 sbk f2, vf2	cutanes ++	vf3, f2, m1 c1	vf3, f3, m2 c1	3	
NOBN1_6	B4	93-154	BN1_6	sbk c1, m2, f2	cutanes +	vf2, f2, m2 c1	vf2, f2, m1	35	
NOBN1_7	B5	154-172	BN1_7	abk m2, f2, vf1 sbk f1, vf1	cutanes ++	f1, m1	vf2, f1	3	
NOBN2_1	A	0-9	BN2_1	sbk: c1, m2, f2 gr: f2, vf2		Vf3, f3, m2, c1,vc1	Vf3, f1 m1	2	150-170: se observa moteado de óxidos de Fe irregulares (poca abundancia), cutanes se localizan preferentemente en moteados de óxidos de Fe. Además, pequeños moteados diseminados de Fe-Mn (poca abundancia). - Perfil general con horizontes diagonales (nohorizontales-> ver dibujo). Entre 97-121 y 121-150 se observan masas de óxidos de Mn, irregulares y moderadamente abundantes.
NOBN2_2	B1	9-39	BN2_2	Sbk: c2, m1 f2, vf1	cutanes -	Vf3, f3, m3, c2, vc1	Vf3, f3 m2	8	
NOBN2_3	B2	39-61	BN2_3	Sbk: m2, f2 vf2	cutanes -	Vf3, f2, m1, c1	Vf3, f2 m1	15	
NOBN2_4	B3	61-97	BN2_4	Abk: co2, m2,f2 Vf2	cutanes ++	Vf1, f1, m1	Vf3, f2 m2	18	
NOBN2_5	B4	97-121	BN2_5	Abk: vc1, c2 M1, f2, vf1	cutanes +	Vf1, f1, m1	Vf2, f2, m1	10	
NOBN2_6	B5	121-150	BN2_6	Abk: c1,m1 F2, vf1	cutanes +	f1-----	Vf3, f2, m1	15	
NOBN2_7	B6	150-170	BN2_7	Abk: c1, m1 F1	cutanes --	f1-----		5	
NOBN3_1	Oi	0-2	BN3_1	Gr: f2, vf2	-	Vf2, f2	Vf: 3 intersticial	3	H A1: trozos de carbón? (¿?) también en B2 y AB H Cr: poros intersticial (intersticiales) H Oi: poros intersticiales
NOBN3_2	A1	2-12	BN3_2	Sbk: f2, m2 vf1 gr: vf2	-	Vf2, f2 M2, c1, vc1	Vf2, f2 M2,-	3	
NOBN3_3	A2	12-23	BN3_3	Abk: m2, f2 Sbk: m1, f2, vf2	-	Vf2, f2 M2, c2, vc1	Vf2, f2 M1 -	7	
NOBN3_4	AB	23-37	BN3_4	Abk: m2, f2 Sbk: m1, f2, vf2	-	Vf2, f2 M3, c1, vc1	Vf2, f2 m2	1	
NOBN3_5	B1	37-64	BN3_5	Abk: m2 Sbk: f2, vf2	cutanes	Vf1, f2 M2, c2, vc1	Vf2,f2 m2	6	
NOBN3_6	B2	64-94	BN3_6	Abk: m2 Sbk: f2, vf2	cutanes -	Vf1, f1 M2, c1	Vf2, f2 M2, c1	8	
NOBN3_7	B3	94-125	BN3_7	Abk: m1 Sbk: f2, vf2	cutanes	Vf1, f1 M1, c1	Vf2, f2 m2	15	
NOBN3_8	BCv	125-146	BN3_8	Abk: m2 Sbk: f2, vf2	cutanes +	Vf1, f1 M2, c1	Vf2, f2 M2	0	
NOBN3_9	Cv	146-165	BN3_9	Masivo	-	Vf1, f2 -	Vf3, f2	-	
NOBN4_1	A1	0-7	BN4_1	Sbk: m1, f2, vf2	-	Vf3, f3 M2, c1, vc2	Vf3, f2, m2, c1	2	139 - 162: moteado irregular "intenso Fe/Mn"; 128-139 Clastos menos alterados y elevada coloración roja, escaso moteado Fe/Mn, capa horizontal de clastos; 96-128 Intenso moteado irregular ox Fe, muy escaso moteado de ox de Mn; 31-43 clastos redondeados de θ ≤ 4cm; 128-139 clastos alterados a caolinita (alteración hidrotermal); Alteración óxidos de Fe-Mn en masas (< very weakly cemented) formas levemente esféricas a irregulares alargadas, con buena a moderada cristalinidad; 139-162 concentración en láminas de ox de Fe-Mn, arcillas (blancas) y óxidos de Fe (rojos) de distribución horizontal en el perfil.
NOBN4_2	A2	7-19	BN4_2	Sbk: m1, f2, vf2	-	Vf3, f2 M2, c1, vc1	Vf3, f2 M2, c1	-	
NOBN4_3	B1	19-31	BN4_3	Sbk: m2, f2, vf2	cutanes --	Vf3, f3 M2, c2, vc1	Vf3, f3, m2, c1	2	
NOBN4_4	B2	31-49	BN4_4	Sbk, c1, m2, m2, f2, vf2	cutanes -	Vf3, f2 M2, c2, vc1	Vf3, f3 m2	10	
NOBN4_5	B3	49-85	BN4_5	Abk: c1, m2 Sbk: m2, f2, vf2	cutanes +	Vf3, f2 M1, c1, vc1	Vf3, f3 m2	5	
NOBN4_6	B4	85-96	BN4_6	Abk: c2, m1 Sbk: m2, f2, vf2	cutanes	Vf1, f2 m1	Vf3, f2 m2	8	
NOBN4_7	B5	96-128	BN4_7	Abk: c2, m2 Sbk: m2, f2, vf2	cutanes ++	Vf1, f1 m1	Vf2, f1 M1	20	
NOBN4_8	B6	128-139	BN4_8	Abk: m2, f2	cutanes ++	f1	Vf2, f1	40	
NOBN4_9	B7	139-162	BN4_9	masivo	cutanes -	-	Vf2	40	

2. Características físicas sitios plantación forestal.

PORC. SITIO	HORIZONTE	PROFUNDIDAD	NOMBRE LAB	ESTRUCTURA	CLAY FILMS	RAÍCES	POROS	FRAGMENTOS ROCOSOS	OBSERVACIONES
NOPL1_1	A1	0-9	PL1_1	sbk: co1, m2, f2, vf2	-	vf3; f3; m2	vf3; f3; m2	-	30-66: últimos 10 cm se observa una alta concentración de clastos redondeados $\theta \leq 10$ cm que generan alta porosidad en el suelo "podría ser otro horizonte"; 19-30: presencia de carbón; 30 - 66: poros de 5- 10 mm (grande) en capa de clastos (conglomerado); 85 - 124: moteados irregulares y alargados verticalmente de óxidos de Fe (rojos) (foto), se observa alto contenido de mica (quizás alterada porque está muy blanda); 124 - 163: moteado irregular de óxidos de Fe-Mn en baja proporción; 163 - 174: moteado irregular de óxido de Fe (rojos) y óxidos de Fe-Mn diseminado, locales (solo en algunos sectores).
NOPL1_2	A2	9-19	PL1_2	abk: co2, m2 sbk: m1, f2, vf2	-	vf3; f2; m2 c1	vf3, f3, m2	1	
NOPL1_3	A3	19-30	PL1_3	abk: co1, m2, f2, vf1 sbk: m1, vf2	-	vf2, f2, m2 c1 -	vf3, f3	-	
NOPL1_4	B1	30-66	PL1_4	abk: co2, m2, f2, vf2	cutanes -	vf2, f1, m1 c1	vf3, f3, m2, c1	12	
NOPL1_5	B2	66-85	PL1_5	abk: co2, m2, f1, vf1	cutanes	vf1, f1 -	vf3, f3 -	2	
NOPL1_6	B3	85-124	PL1_6	abk: m2, f2	cutanes +	f1 -	vf3, f3, m2	3	
NOPL1_7	B4	124-163	PL1_7	masivo	cutanes +	f1 -	vf3, f3 -	-	
NOPL1_8	B5	163-174	PL1_8	masivo	cutanes +	c1 -	vf3, f3	-	
NOPL2_1	A1	0-6	PL2_1	gr, vf2, f3, m1 sbk, f2, m1		vf2, f2 m1, c1	vf3, f2 -	0	En general en el perfil no se ven estructuras, excepto en horizonte A1 (0-6); h3 (36-62) se observan finos trozos de carbón, también en h4 (62-95); h5 (95-132) nivel conglomerádico matriz soportado, clastos redondeados a subangulares de 10 cm a menores muy meteorizados; h6 (132-147) nivel con clastos de 2 cm a menores muy meteorizados y presencia de carbón.
NOPL2_2	A2	6-36	PL2_2	sbk, f1, m1 -		vf1, f1 m1 -	vf2, f1 m1	2	
NOPL2_3	B1	36-62	PL2_3	abk, m2, co1 f1 -	cutanes -	vf1, f1 m1 -	vf2, f2 -	5	
NOPL2_4	B2	62-95	PL2_4	abk, f2, vf2 m1 -	cutanes	vf1, f1 -	vf2, f1 -	2	
NOPL2_5	B3	95-132	PL2_5	abk, m2, f2 vf2 -	cutanes +	vf1, f1 -	vf2, f1 -	35	
NOPL2_6	B4	132-147	PL2_6	abk, m2, f2, vf1	cutanes ++	-	vf2 f1	13	
NOPL2_7	B5	147-172	PL2_7	abk, m2, f2 -	cutanes ++	-	vf1 -	8	
NOPL3_1	O/A1	0-9	PL3_1	sbk, vf1, f2, m2 abk f1	-	vf2, f2 m1	vf2, f2 m1	-	
NOPL3_2	A	9-24	PL3_2	sbk, vf1, f2, m2	-	vf2, f2 m1, c1	vf2, f2, m1, c1	10	
NOPL3_3	B1	24-44	PL3_3	sbk f2, m2	cutanes --	vf2, f2 m1	vf2, f2 m2	≈ 30	
NOPL3_4	B2	44-66	PL3_4	abk m2, CO2 f1	cutanes --	vf2, f2 m1	vf2, f2, m2	25	
NOPL3_5	B3	66-83	PL3_5	sbk m2, f2 abk m2, f2	cutanes -	vf2, f2 m1	vf2, f2 m2	20	
NOPL3_6	B4	83-94	PL3_6	abk f2, m2		vf2, f1 m2	vf2, f2, m1	30	
NOPL3_7	B5	94-107	PL3_7	abk f2, m2	cutanes	vf1, f2 m1	vf2, f2 m2	15	
NOPL3_8	B6	107-125	PL3_8	abk m2, c2, f1	cutanes bien formados	vf1, f2 c1	vf2, f1 m2	20	
NOPL3_9	B7	125-135	PL3_9	abk m2, c2	cutanes ++	vf1, f2 c1	vf2, f2 m2	5	
NOPL3_10	B8	135-157	PL3_10	abk m2, c2	cutanes +	f1, c1	vf1, f1	0	
NOPL4_1	A1	0-3	PL4_1	sbk: f2, vf2 gr: vf2	-	vf2, f2 m2, c2 vc2	IR	3	0 - 3: poros intersticiales; 112 - 143: clastos grandes con suelo en intersticios (parece un horizonte C, pero hay clastos con vértices redondeados).
NOPL4_2	A2	3-9	PL4_2	sbk: co1, f2, vf2 abk: m2, f2, vf2	-	vf2, f2 m2, c1	m2, f2 vf2	5	
NOPL4_3	A3	9-30	PL4_3	abk: m2, f2 sbk: m1, f2, vf2	-	vf2, f2 m1, c1	vf: 2 f2	8	
NOPL4_4	B1	30-55	PL4_4	sbk: m2, f2 vf2	cutanes -	vf2, f2 -	vf2 f1	18	
NOPL4_5	B2	55-81	PL4_5	abk: m1 sbk: m2, f2 vf: 1	cutanes	vf2 f1	vf2 f1	35	
NOPL4_6	B3	81-99	PL4_6	sbk: co1, m2 f2, vf1	cutanes -	vf2 f2	vf2 f1	35	
NOPL4_7	B4	99-112	PL4_7	sbk: m2, f2 vf:1	cutanes --	vf2 f1	vf2 f1, m1	5	
NOPL4_8	B5	112-143	PL4_8	sbk: m2 f1, vf1		vf2 f1	f1 vf2	40	
NOPL4_9	Cr	143-162	PL4_9	m (masivo)	-	vf1 f1	IR	-	

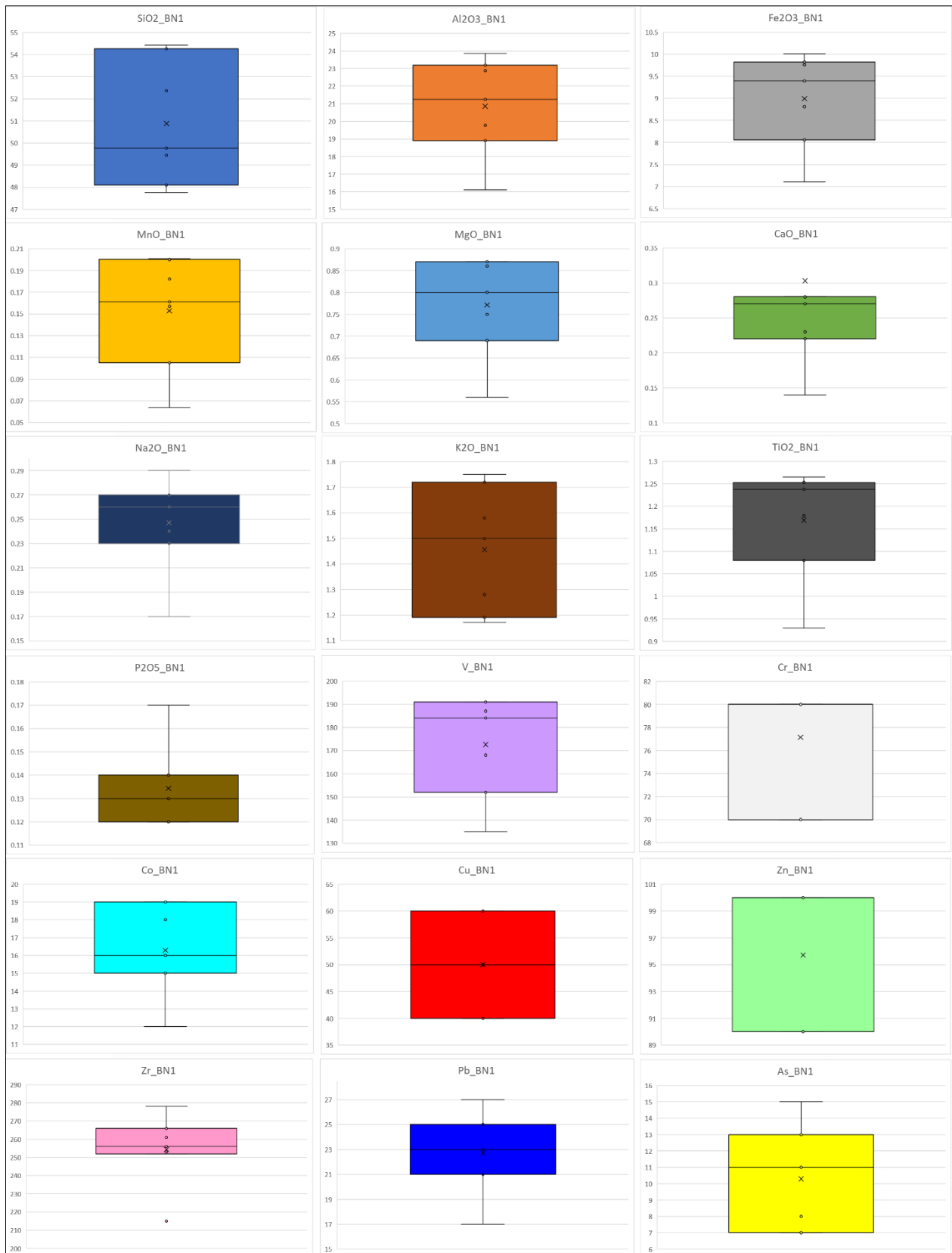
3. Tabla resultados análisis químico sitios bosque nativo filtrada.

Analizado	SiO2	Al2O3	Fe2O3(T)	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	TiO2	P2O5	V	Cr	Co	Cu	Zn	Zr	Pb	As	
Unidad	w%	w%	w%	w%	w%	w%	w%	w%	w%	w%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	
Método de Análisis	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP	
Muestras Nativo	BN1-1	49.77	16.11	7.1	0.201	0.8	0.7	0.27	1.58	0.93	0.17	135	70	12	40	100	215	23	13
	BN1-2	54.43	18.91	8.06	0.2	0.86	0.28	0.29	1.75	1.08	0.12	152	80	15	40	90	278	17	11
	BN1-3	54.27	19.77	8.81	0.157	0.87	0.22	0.27	1.72	1.179	0.13	168	80	16	40	100	266	25	11
	BN1-4	52.37	21.25	9.39	0.182	0.87	0.27	0.26	1.5	1.238	0.12	184	80	18	50	100	261	23	7
	BN1-5	48.1	23.19	9.82	0.161	0.75	0.28	0.24	1.19	1.24	0.14	191	80	19	60	90	252	21	7
	BN1-6	49.45	22.87	9.76	0.105	0.69	0.23	0.23	1.28	1.265	0.14	191	80	19	60	100	256	23	8
	BN1-7	47.77	23.86	10.01	0.064	0.56	0.14	0.17	1.17	1.253	0.12	187	70	15	60	90	253	27	15
	BN2-1	48.7	16.84	7.55	0.123	0.9	0.43	0.33	1.59	1.074	0.11	156	70	12	40	70	202	10	7
	BN2-2	53.15	19.91	8.94	0.074	0.91	0.2	0.29	1.63	1.24	0.1	184	80	15	60	80	269	19	9
	BN2-3	52.54	21.8	9.42	0.064	0.91	0.1	0.22	1.68	1.221	0.1	188	80	13	60	90	288	22	8
	BN2-4	52.34	21.93	9.1	0.052	0.89	0.06	0.21	1.88	1.066	0.11	169	80	12	70	100	253	29	17
	BN2-5	56.3	20.9	8.05	0.05	0.94	0.04	0.17	2.05	0.962	0.12	144	70	13	50	90	278	24	14
	BN2-6	58.25	19.32	7.32	0.047	1.06	0.04	0.13	1.96	0.918	0.13	128	70	11	40	80	339	22	13
	BN2-7	60.16	17.82	7.18	0.051	1.34	0.04	0.11	1.85	0.945	0.11	124	70	13	40	100	384	25	16
	BN4-1	56.39	16.18	6.68	0.078	0.31	0.18	0.16	1.12	0.97	0.1	136	50	8	40	40	272	10	13
	BN4-2	59.54	17.46	7.12	0.06	0.32	0.13	0.16	1.21	1.04	0.09	146	50	8	30	40	306	14	13
	BN4-3	61.32	18.09	7.16	0.044	0.28	0.07	0.12	1.33	1.03	0.08	143	50	7	30	50	317	19	9
	BN4-4	62.61	17.73	6.69	0.036	0.25	0.05	0.12	1.42	0.923	0.09	131	50	6	30	50	305	24	20
	BN4-5	65.54	17.65	5.94	0.024	0.22	0.03	0.11	1.66	0.741	0.1	103	30	4	20	40	308	26	19
	BN4-6	67.72	16.5	5.26	0.023	0.29	0.02	0.1	1.82	0.658	0.09	86	30	3	20	50	327	28	16
	BN4-7	66.18	16.3	6.22	0.028	0.33	0.02	0.11	1.68	0.777	0.12	105	30	4	20	50	361	31	16
	BN4-8	65.84	17.79	5.44	0.042	0.34	0.02	0.1	2.13	0.606	0.11	93	30	6	30	50	263	27	38
	BN4-9	60.44	19.99	6.8	0.093	0.47	0.02	0.18	2.67	0.784	0.14	128	50	17	30	70	223	28	62

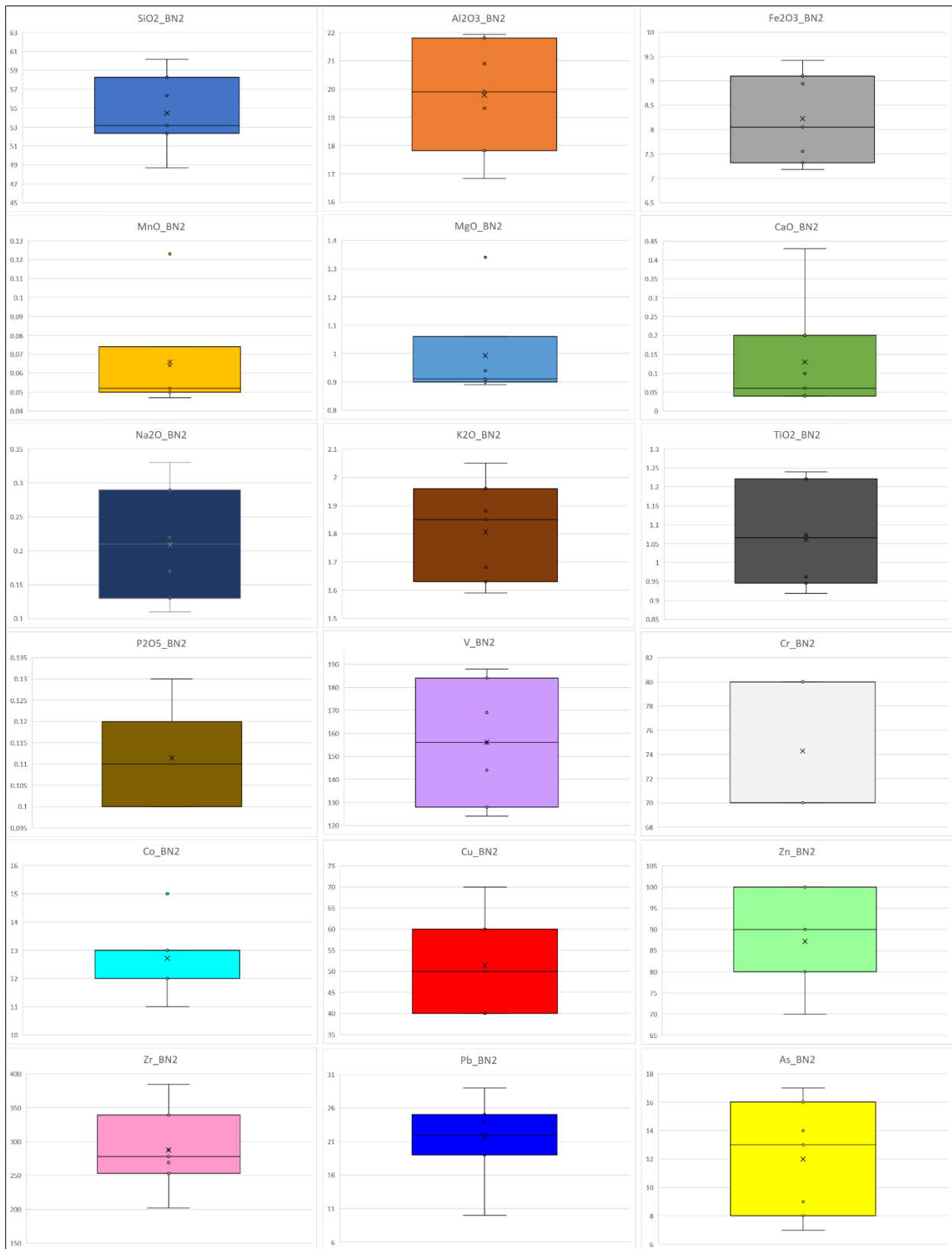
4. Tabla resultados análisis químico sitios plantación forestal filtrada.

Analizado	SiO2	Al2O3	Fe2O3(T)	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	TiO2	P2O5	V	Cr	Co	Cu	Zn	Zr	Pb	As	
Unidad	w%	w%	w%	w%	w%	w%	w%	w%	w%	w%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	
Método de Análisis	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP	FUS-ICP	
Muestras Plantación	PL1-1	63.28	12.11	5.37	0.11	0.39	0.26	0.21	1.21	0.93	0.09	111	50	7	30	60	302	18	11
	PL1-2	65.12	13.84	5.85	0.094	0.41	0.21	0.2	1.29	0.981	0.07	119	50	8	20	50	328	10	8
	PL1-3	65.06	14.93	6.16	0.081	0.42	0.18	0.19	1.32	0.987	0.06	124	50	8	30	70	302	18	8
	PL1-4	66.09	15.52	6.26	0.059	0.43	0.13	0.17	1.54	0.975	0.06	126	60	8	30	60	327	17	8
	PL1-5	63.33	18.64	5.85	0.033	0.41	0.05	0.16	2.35	0.705	0.05	105	50	5	40	50	233	16	14
	PL1-6	66.64	18.17	5.57	0.024	0.31	0.04	0.12	1.79	0.604	0.08	94	40	5	50	40	212	18	20
	PL1-7	64.34	18.52	6.75	0.034	0.35	0.05	0.09	1.28	0.854	0.07	113	40	5	20	50	352	27	18
	PL1-8	66.41	16.97	6.16	0.033	0.42	0.05	0.09	1.43	0.818	0.08	107	40	5	20	60	362	27	18
	PL3-1	62.2	15.01	6.35	0.083	0.57	0.25	0.28	1.48	1.02	0.1	135	60	10	30	80	258	12	8
	PL3-2	60.45	16.25	7	0.079	0.62	0.22	0.29	1.53	1.09	0.11	153	60	11	40	80	262	15	8
	PL3-3	61.57	17.97	7.17	0.061	0.69	0.16	0.26	1.98	1.139	0.11	163	70	11	40	80	290	17	9
	PL3-4	60.29	19.96	7.24	0.047	0.75	0.09	0.22	2.38	1.014	0.11	166	80	14	40	100	267	23	9
	PL3-5	59.8	19.2	7.49	0.04	0.72	0.1	0.23	2.26	1.042	0.11	165	80	11	40	90	274	21	11
	PL3-6	61.6	18.97	6.77	0.029	0.58	0.07	0.21	2.52	0.962	0.11	154	70	8	40	70	261	20	13
	PL3-7	62.49	19.29	6.58	0.023	0.51	0.07	0.21	2.61	0.926	0.12	148	70	7	40	60	247	21	18
	PL3-8	61.16	20	7.07	0.021	0.5	0.04	0.24	2.99	0.953	0.13	166	80	6	30	50	257	22	16
	PL3-9	58.49	20.45	8.59	0.023	0.44	0.04	0.23	2.76	1.049	0.15	185	80	6	30	50	279	25	21
	PL3-10	58.6	20.32	8.89	0.031	0.55	0.04	0.22	2.64	1.042	0.14	183	90	7	40	60	261	31	18
	PL4-1	53.58	12.9	5.31	0.152	0.57	0.38	0.27	1.67	0.858	0.12	113	60	9	20	15	229	2.5	12
	PL4-2	61.89	16	6.47	0.12	0.64	0.22	0.28	1.91	1.023	0.11	133	60	10	30	70	304	12	12
	PL4-3	61.15	16.5	6.63	0.142	0.69	0.22	0.29	1.92	0.992	0.12	132	70	11	30	90	247	19	14
	PL4-4	62.45	16.82	6.49	0.092	0.77	0.13	0.23	2.03	0.888	0.09	126	70	11	40	80	277	20	10
	PL4-5	61.22	19.02	7.43	0.092	1.18	0.1	0.23	2.72	0.97	0.1	150	90	13	40	110	281	26	12
	PL4-6	64.11	17.01	6.26	0.072	0.93	0.08	0.21	2.44	0.761	0.1	112	70	10	30	90	240	24	14
	PL4-7	65.04	17.29	5.69	0.065	0.73	0.07	0.22	2.49	0.715	0.09	106	60	8	30	90	227	24	18
	PL4-8	62.84	18.74	6.2	0.072	0.8	0.07	0.25	2.83	0.8	0.1	118	70	8	30	100	209	28	20
	PL4-9	59.26	20.29	7.13	0.095	0.9	0.07	0.24	2.86	0.929	0.1	133	80	12	30	110	219	29	17

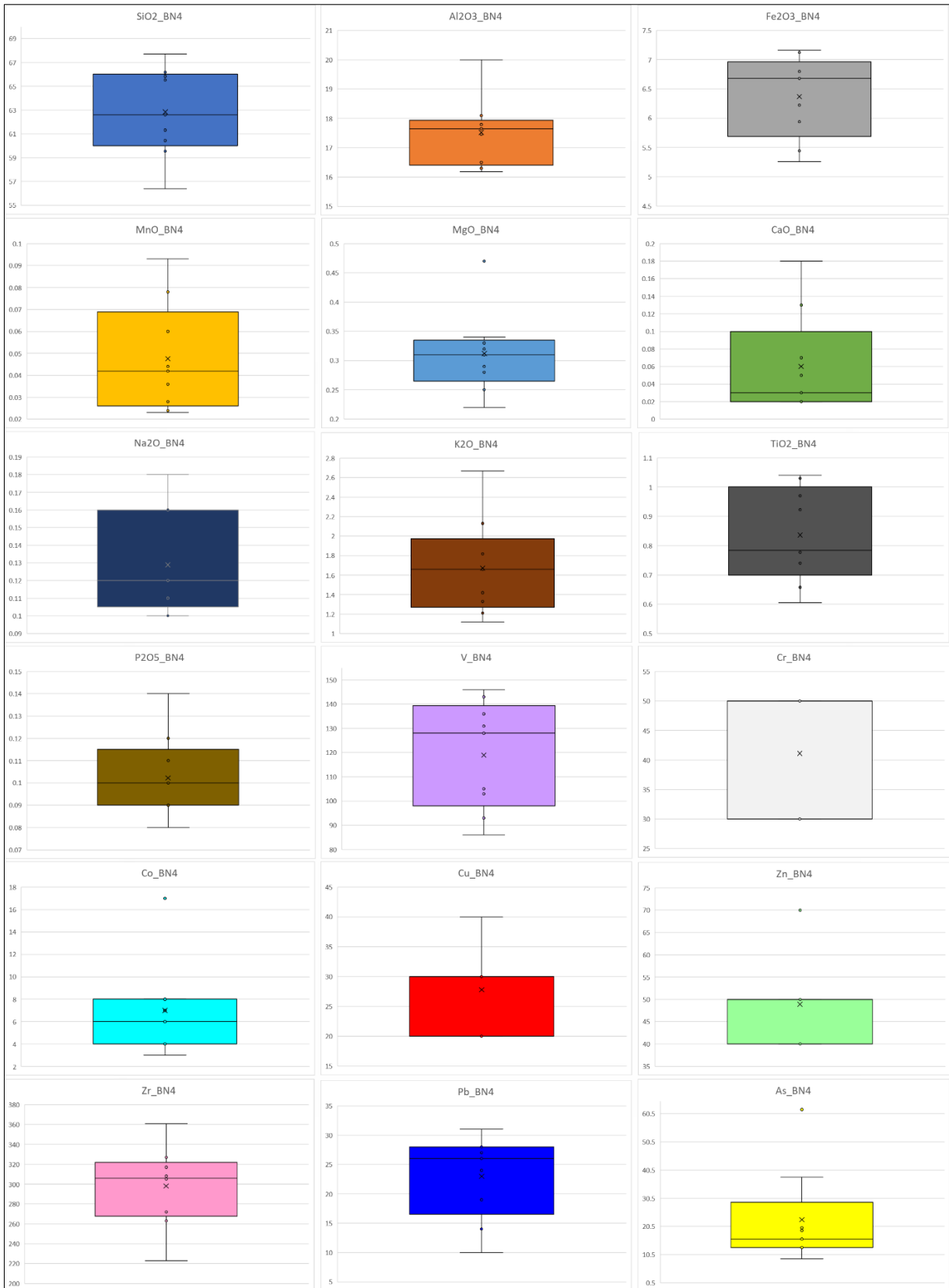
5. Box plots por elemento individual en BN1.



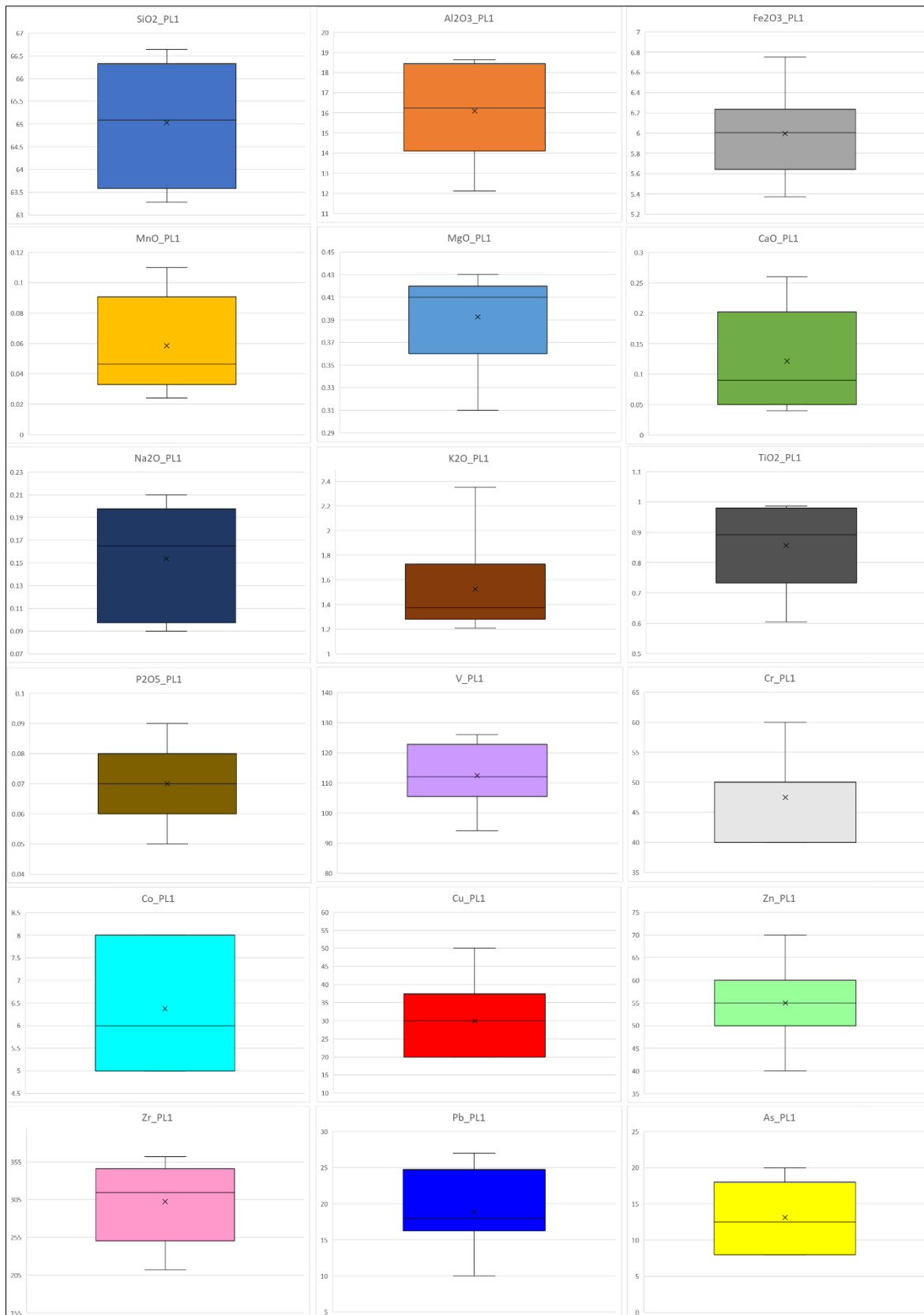
6. Box plots por elemento individual BN2.



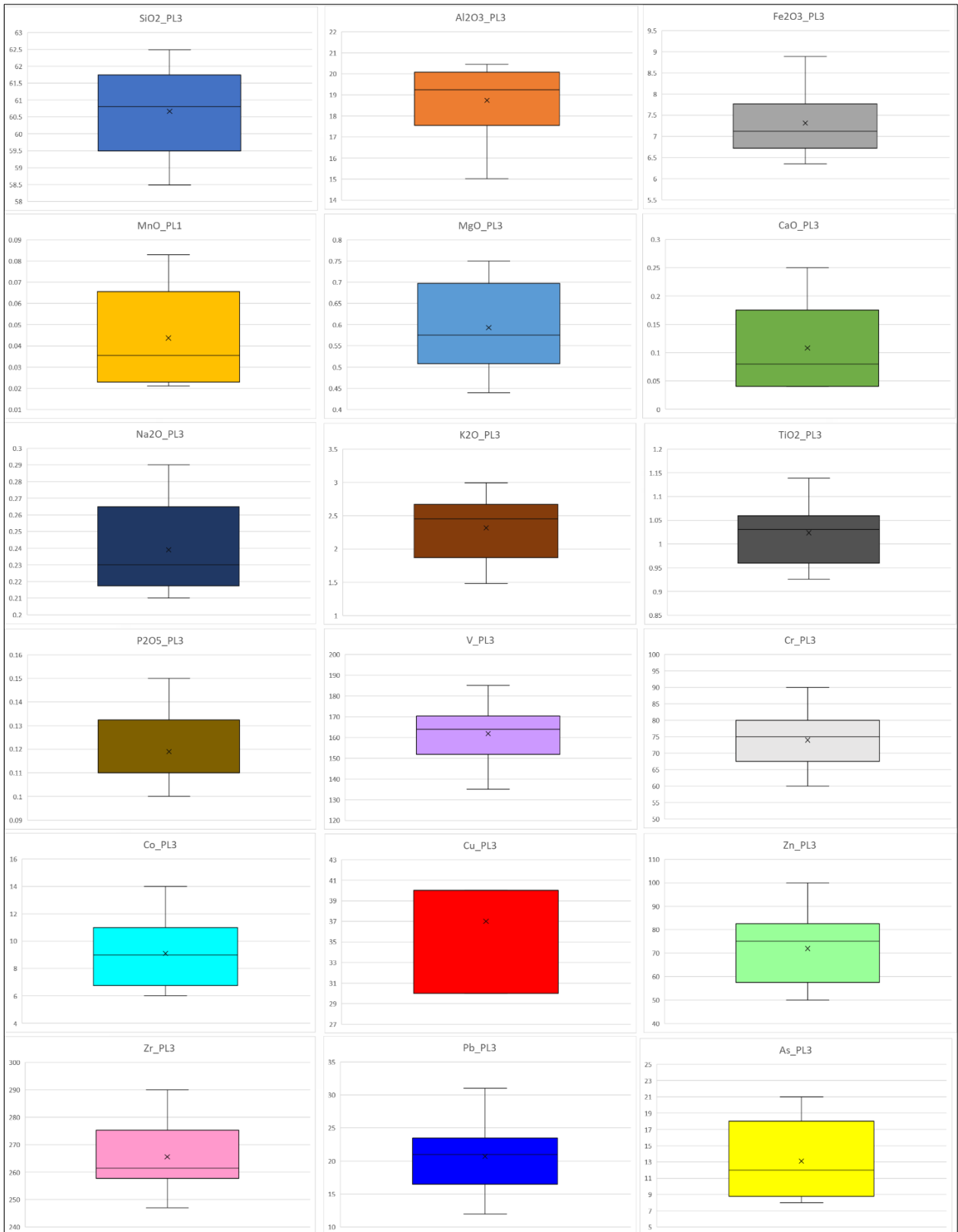
7. Box plots por elemento individual BN4.



8. Box plots por elemento individual PL1.



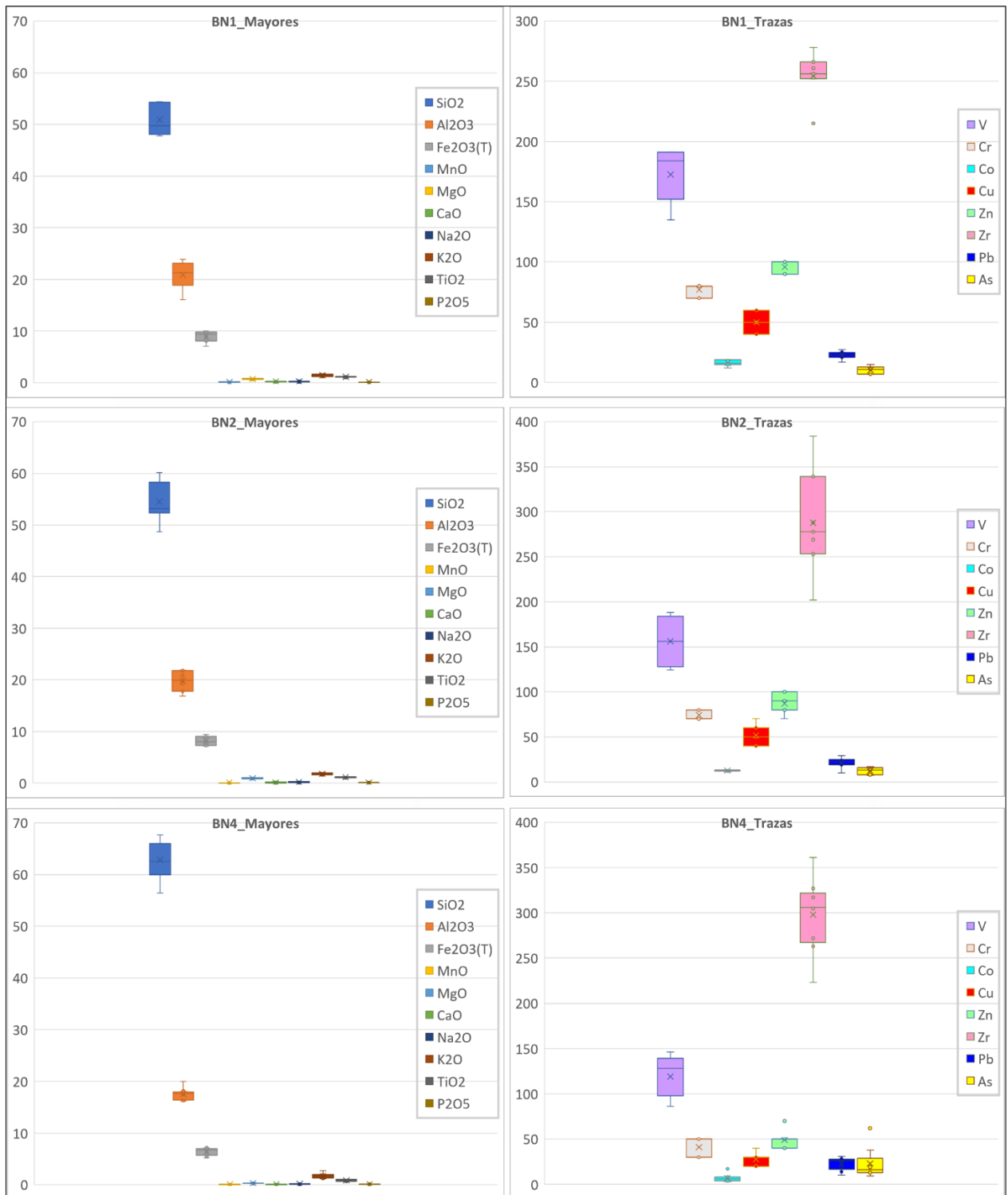
9. Box plots por elemento individual PL3.



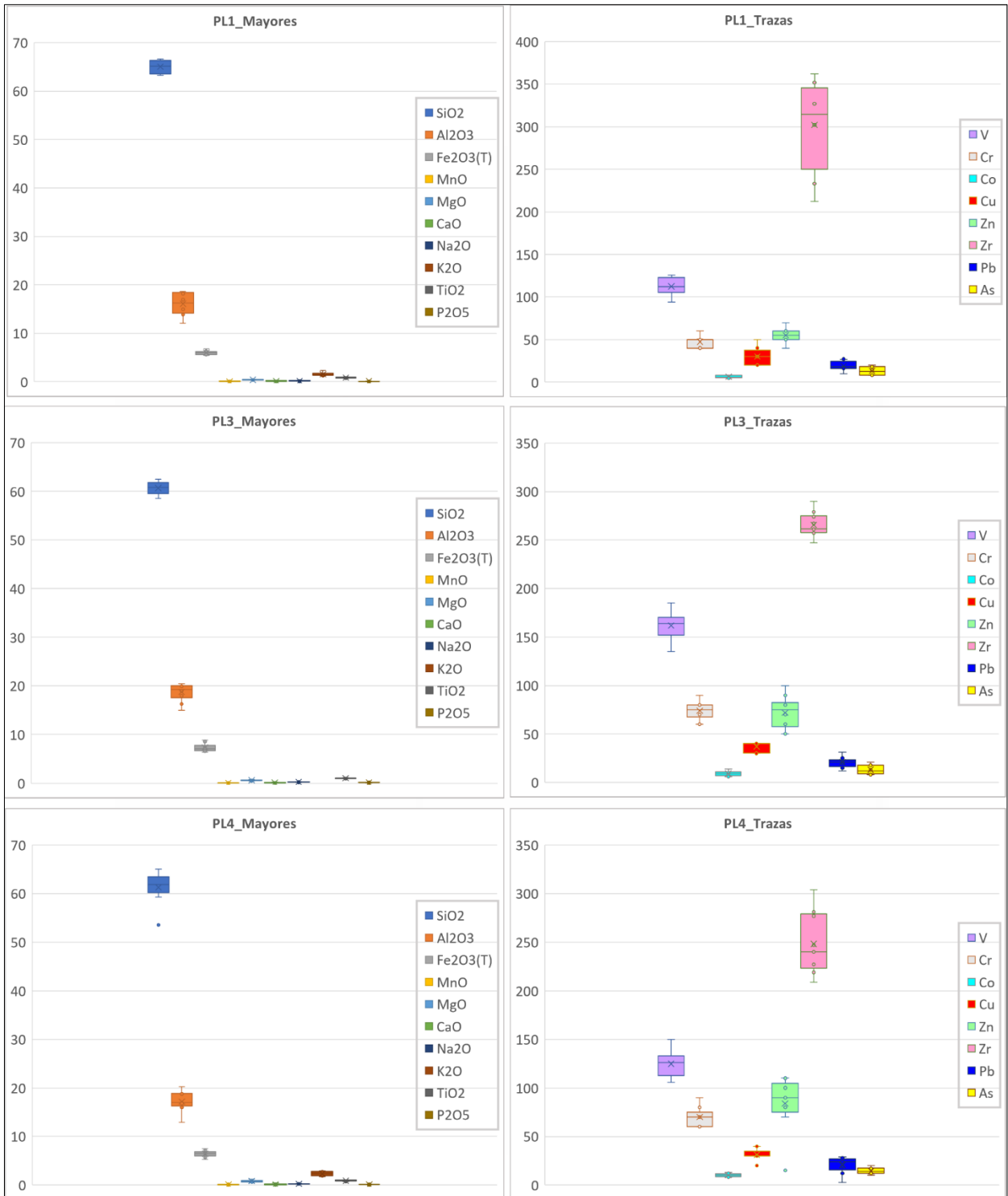
10. Box plots por elemento individual PL4.



11. Box plots por perfil en sitios bosque nativo.



12. Box plots por perfil en sitios plantación forestal.



13. Perfiles de empobrecimiento por elemento individual.

