



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
GEOLOGÍA

**COMPARACIÓN DE LA GEOQUÍMICA DEL GRUPO
DE LAS TIERRAS RARAS EN BOSQUE NATIVO
VERSUS PLANTACIONES DE *PINUS SP.* EN EL
PARQUE NACIONAL NONGUÉN, REGIÓN DEL
BIOBÍO, CHILE.**

Memoria para optar al Título de Geólogo

Ignacio Andrés Avilés Quijón

Profesora Guía: Dra. Fernanda Carolina Álvarez Amado
Profesora Co-Guía: Dra. Pamela Ivonne Castillo Lagos
Profesora Comisión: Dra. Javiera Paz Gerding González

Concepción, 2024

AGRADECIMIENTOS

Agradecer el apoyo financiero brindado por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) mediante el proyecto de cooperación internacional MPG 190022 entre la Universidad de Concepción y el *Max Planck Institute for Biogeochemistry*, dirigido por el Dr. Felipe Aburto; como también al proyecto VRID InvestigadorAS 2022000571, cuya investigadora responsable es la Dra. Fernanda Álvarez Amado.

Agradezco también a la Dra. Fernanda Álvarez y Dra. Pamela Castillo, por considerarme para este proyecto y permitir realizar mi memoria junto a ellas, además de guiarme a lo largo de todo este tiempo de arduo trabajo, agradezco todo el apoyo que me brindaron en este proceso, tanto en lo académico como en lo emocional, la paciencia y la motivación que brindaron en mí para llevar a cabo este proyecto. También agradezco a Maite, por hacer más llevaderos los trabajos de laboratorio, y a Josefa y Nico, por reemplazarme cuando fue necesario.

Agradezco a mi novia Paula, quién fue fundamental durante estos 7 años de carrera, siempre estando ahí en los días buenos y malos, apoyándome, conteniéndome y motivándome para lograr este objetivo. A mis padres Maritté y Manuel, y a mi hermana Daiana, por siempre confiar en mí y brindarme su apoyo incondicional desde la distancia. A mis suegros Andrea y Silverio, y a mi cuñada Antonia, que a la distancia también se preocuparon de apoyarme siempre. A la familia de Paula en Concepción, quienes me acogieron y brindaron un nuevo hogar durante todos estos años, y a Raya, mi perrita, por hacerme compañía en esas largas noches de estudio y preparación de mi memoria.

Agradezco también a mis amigos de la universidad, Ro, por siempre acompañarme y hacer los trabajos en equipo, al Milla, al Mati y a Cata, por ser parte fundamental de este proceso y quienes con su amistad me hicieron disfrutar el proceso, a todos mis compañeros por alegrar mi día a día universitario y los terrenos. Finalmente, agradezco a Héctor y Verónica por ser un gran apoyo en mis primeros años en Concepción.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Objetivos	2
1.1.1	Objetivo general	2
1.1.2	Objetivos específicos	3
1.1.3	Hipótesis	3
1.2	Ubicación y accesos	3
1.3	Trabajos previos	4
2	MARCO GEOLÓGICO	6
2.1	Geomorfología	6
2.1.1	Cordones graníticos	7
2.1.2	Plataformas graníticas	8
2.1.3	Llanuras y valles aluviales	9
2.2	Geología	10
2.2.1	Basamento Metamórfico	10
2.2.1.1	Serie Oriental	11
2.2.2	Batolito Costero del Sur (BCS)	11
2.2.2.1	Granitoides Concepción (GC)	12
2.2.3	Sedimentos de Valles Actuales	13
2.3	Geología Estructural	13
3	MARCO TEÓRICO	14
3.1	Suelo	14
3.1.1	Horizontes de suelo	15
3.2	Coberturas y usos de suelos	17
3.3	Tierras raras	18
3.3.1	Generalidades	18
3.3.2	Clasificación según su peso atómico	19
3.3.3	Abundancia	20
3.3.4	Propiedades	21
4	METODOLOGÍA	22
4.1	Primera etapa	22
4.1.1	Etapa de terreno	22
4.1.2	Preparación de las muestras	25

4.2	Segunda etapa	25
4.2.1	Recopilación bibliográfica	26
4.2.2	Trabajo de laboratorio	26
4.2.2.1	Textura de suelo	26
4.3	Tercera etapa	27
4.3.1	Análisis de datos	27
4.3.1.1	Control de calidad	27
4.3.1.2	Tierras raras (REE)	28
4.3.1.3	Carbono (C)	29
5	RESULTADOS	30
5.1	Control de calidad datos	30
5.2	Recopilación datos de roca	30
5.3	Descripción física de los suelos	31
5.4	Geoquímica de los elementos del grupo de las tierras raras	34
5.4.1	Patrones multielemento	34
5.4.1.1	Sitios en bosque nativo	34
5.4.1.2	Sitios en plantaciones	36
5.4.2	Distribución del contenido de REE en el perfil de suelo	38
5.4.2.1	Sitios en bosque nativo	39
5.4.2.2	Sitios en plantaciones	41
5.4.3	Comparación del contenido de REE entre sitios	42
5.5	Coefficiente de transferencia de masa	43
5.5.1	Diagramas multielemento τ_{ij}	45
5.5.2	Coefficientes de transferencia de masa en profundidad	47
5.6	Materia Orgánica	51
5.7	Matrices de correlación	53
5.7.1	Matrices incluyendo textura de suelo	55
6	DISCUSIÓN	57
6.1	Factores que controlan la distribución de las REE	57
6.2	Comportamiento y distribución de las REE	58
6.2.1	Variaciones entre sitios con la misma cobertura	58
6.2.2	Variaciones entre sitios con diferente cobertura	60

6.3	Influencia del cambio de uso de suelo en la geoquímica de las REE _____	61
6.4	Recomendaciones para mejorar la calidad del estudio _____	63
7	<i>CONCLUSIÓN</i> _____	65
8	<i>REFERENCIAS</i> _____	66
9	<i>ANEXOS</i> _____	71

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.1: mapa de ubicación zona de estudio.</i>	4
<i>Figura 2.1: mapa geomorfológico del área de estudio. Extraído de Aguilar (2024).</i>	7
<i>Figura 2.2: mapa geológico área de estudio, modificado de Ramírez (2004).</i>	10
<i>Figura 3.1: perfil de suelo con sus respectivos horizontes. Modificado de Weil y Brady (2017).</i>	15
<i>Figura 3.2: mapa de cobertura de suelo Parque Nacional Nonguén. Extraído de Aguilar (2024).</i>	18
<i>Figura 3.3: abundancia relativa de elementos químicos en la corteza superior terrestre. Modificado de USGS, Rare Earth Elements - Critical Resources for High Technology (2002).</i>	20
<i>Figura 4.1: en (A) toma de muestras de suelo en calicata PL3. En (B) registro de descripción del perfil de suelo PL3.</i>	23
<i>Figura 4.2: sitios de estudio de este trabajo, la parte superior corresponde a parcelas en bosque nativo y la parte inferior corresponde a parcelas de plantación de Pinus sp. A.- Corresponde a sitio BNI. B.- Corresponde a sitio BN2. C.- Corresponde a BN4. D.- Corresponde a sitio PL1. E.- Corresponde a sitio PL3. F. Corresponde a sitio PL4.</i>	24
<i>Figura 4.3: calicatas realizadas en los sitios. A.- Calicata en BNI. B.- Calicata en BN3. C.- Calicata en PL1. D.- Calicata en PL4.</i>	24
<i>Figura 5.1: perfiles de los horizontes y su respectiva muestra para los sitios BN. En (A) BNI. En (B) BN2. En (C) BN4. Extraído y modificado de Navarrete, 2023.</i>	32
<i>Figura 5.2: perfiles de los horizontes y su respectiva muestra para los sitios PL. En (A) PL1. En (B) PL3. En (C) PL4. Extraído y modificado de Navarrete, 2023.</i>	33
<i>Figura 5.3: (A) Patrones de tierras raras (REE) para las muestras del sitio BNI. (B) Patrones de REE para las muestras del sitio BN2. (C) Patrones de REE para las muestras del sitio BN4. (D) Patrones de REE para contenidos ponderados en cada uno de los sitios y para la “muestra promedio” de roca parental. Todos los contenidos están normalizados al Condrito.</i>	36
<i>Figura 5.4: (A) Patrones de tierras raras (REE) para las muestras del sitio PL1. (B) Patrones de REE para las muestras del sitio PL2. (C) Patrones de REE para las muestras del sitio PL4. (D) Patrones de REE para contenidos ponderados en cada uno de los sitios.</i>	38

<i>Figura 5.5: contenidos de la sumatoria de tierras raras (ΣLREE, ΣMREE, ΣHREE) en ppm a lo largo del perfil de suelo (profundidad) en cada sitio ubicado bajo uso de suelo de bosque nativo. En (A) concentraciones de ΣLREE. En (B) concentraciones de ΣMREE. En (C) concentraciones de ΣHREE.</i>	40
<i>Figura 5.6: contenidos de la sumatoria de tierras raras (ΣLREE, ΣMREE, ΣHREE) en ppm a lo largo del perfil de suelo (profundidad) en cada sitio ubicado bajo uso de suelo de plantaciones de <i>Pinus sp.</i> En (A) concentraciones de ΣLREE. En (B) concentraciones de ΣMREE. En (C) concentraciones de ΣHREE.</i>	41
<i>Figura 5.7: diagramas “boxplot” de la sumatoria de tierras raras en los seis sitios de estudio. En (A) concentraciones de ΣLREE. En (B) concentraciones de ΣMREE. En (C) concentraciones de ΣHREE.</i>	42
<i>Figura 5.8: diagramas multielemento τ_{ij} para cada parcela de estudio. En (A) τ_{ij} por elemento para BN1. En (B) τ_{ij} por elemento para BN2. En (C) τ_{ij} por elemento para BN4. En (D) τ_{ij} del promedio ponderado de cada elemento en cada sitio de estudio.</i>	45
<i>Figura 5.9: diagramas multielemento τ_{ij} para cada parcela de estudio. En (A) τ_{ij} por elemento para PL1. En (B) τ_{ij} por elemento para PL3. En (C) τ_{ij} por elemento para PL4. En (D) τ_{ij} del promedio ponderado de cada elemento en cada sitio de estudio.</i>	46
<i>Figura 5.10: gráficos de profundidad v/s τ_{ij} para las LREE de las seis parcelas de estudio. En (A) τ_{ij} para el lantano (La). En (B) τ_{ij} para el cerio (Ce). En (C) τ_{ij} para praseodimio (Pr). En τ_{ij} (D) para el neodimio (Nd).</i>	48
<i>Figura 5.11: gráficos de profundidad v/s τ_{ij} para las MREE de las seis parcelas de estudio. En (A) τ_{ij} para el samario (Sm). En (B) τ_{ij} para el europio (Eu). En (C) τ_{ij} para gadolinio (Gd). En τ_{ij} (D) para el terbio (Tb). En (E) τ_{ij} para el disprosio (Dy). En (F) τ_{ij} para el holmio.</i>	49
<i>Figura 5.12: gráficos de profundidad v/s τ_{ij} para las LREE de las seis parcelas de estudio. En (A) τ_{ij} para el erbio (Er). En (B) τ_{ij} para el tulio (Tm). En (C) τ_{ij} para iterbio (Yb). En τ_{ij} (D) para el lutecio (Lu).</i>	50
<i>Figura 5.13: gráfico profundidad v/s materia orgánica (%).</i>	53

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 2.1: unidades geomorfológicas de la cuenca del río Nonguén. Extraído de EULA (2002)</i>	6
<i>Tabla 5.1: errores analíticos calculados mediante la fórmula (5.1) para cada elemento del grupo de las tierras raras.</i>	30
<i>Tabla 5.2: recopilación de datos de REE para rocas graníticas del Batolito Costero del Sur. Concentraciones en ppm.</i>	31
<i>Tabla 5.3: contenidos de REE (ppm) para las muestras de los tres sitios (BN1, BN2, BN4) ubicados en bosque nativo y promedios ponderados para cada sitio.</i>	35
<i>Tabla 5.4: contenidos de REE (ppm) para las muestras de los tres sitios (PL1, PL3, PL4) ubicados en plantaciones de Pinus sp. y promedios ponderados para cada sitio.</i>	37
<i>Tabla 5.5: coeficientes de transferencia de masa (τ_{ij}) para cada elemento de las REE en cada muestra de bosque nativo.</i>	43
<i>Tabla 5.6: coeficientes de transferencia de masa (τ_{ij}) para cada elemento de las REE en cada muestra de plantaciones.</i>	44
<i>Tabla 5.7: contenidos de materia orgánica para cada muestra.</i>	52
<i>Tabla 5.8: matriz de correlación REE, MO y profundidad para sitios de bosque nativo.</i>	54
<i>Tabla 5.9: matriz de correlación REE, MO y profundidad para sitios de plantaciones.</i>	54
<i>Tabla 5.10: matriz de correlación REE, MO, textura de suelo y profundidad para sitios de bosque nativo.</i>	56
<i>Tabla 5.11: matriz de correlación REE, MO, textura de suelo y profundidad para sitios de plantaciones</i>	56

ÍNDICE DE ANEXOS

<i>Anexo 1: tabla grupo de las tierras raras y sus características generales. Basado en Gupta y Krishnamurthy (2005).</i>	71
<i>Anexo 2: contenidos de tierras raras livianas (LREE) en ppm a lo largo del perfil de suelo (profundidad) en cada sitio ubicado bajo bosque nativo. En (A) concentraciones de lantano (La). En (B) concentraciones de cerio (Ce). En (C) concentraciones de praseodimio (Pr) y en (D) concentraciones de neodimio (Nd).</i>	72
<i>Anexo 3: contenidos de tierras raras medianas (MREE) en ppm a lo largo del perfil de suelo (profundidad) en cada sitio ubicado bajo uso de suelo de bosque nativo. En (A) concentraciones de samario (Sm). En (B) concentraciones de europio (Eu). En (C) concentraciones de gadolinio (Gd). En (D) concentraciones de terbio (Tb). En (E) concentraciones de disprosio (Dy). En (F) concentraciones de holmio (Ho).</i>	73
<i>Anexo 4: contenidos de tierras raras livianas (LREE) en ppm a lo largo del perfil de suelo (profundidad) en cada sitio ubicado bajo uso de suelo de plantaciones de Pinus sp. En (A) concentraciones de lantano (La). En (B) concentraciones de cerio (Ce). En (C) concentraciones de praseodimio (Pr) y en (D) concentraciones de neodimio (Nd).</i>	74
<i>Anexo 5: contenidos de tierras raras pesadas (HREE) en ppm a lo largo del perfil de suelo (profundidad) en cada sitio ubicado bajo bosque nativo. En (A) concentraciones de erbio (Er). En (B) concentraciones de tulio (Tm). En (C) concentraciones de iterbio (Yb) y en (D) concentraciones de lutecio (Lu).</i>	74
<i>Anexo 6: contenidos de tierras raras medianas (MREE) en ppm a lo largo del perfil de suelo (profundidad) en cada sitio ubicado bajo uso de suelo de plantaciones de Pinus sp. En (A) concentraciones de samario (Sm). En (B) concentraciones de europio (Eu). En (C) concentraciones de gadolinio (Gd). En (D) concentraciones de terbio (Tb). En (E) concentraciones de disprosio (Dy). En (F) concentraciones de holmio (Ho).</i>	75
<i>Anexo 7: contenidos de tierras raras pesadas (HREE) en ppm a lo largo del perfil de suelo (profundidad) en cada sitio ubicado bajo uso de suelo de plantaciones de Pinus sp. En (A) concentraciones de erbio (Er). En (B) concentraciones de tulio (Tm). En (C) concentraciones de iterbio (Yb) y en (D) concentraciones de lutecio (Lu).</i>	76
<i>Anexo 8: diagramas boxplot para cada elemento y la Σ de LREE, MREE y HREE en sitios BN.</i>	77

<i>Anexo 9: diagramas boxplot para cada elemento y la Σ de LREE, MREE y HREE en sitios PL.</i>	78
<i>Anexo 10: diagramas boxplot para cada elemento y la Σ de LREE, MREE y HREE en sitios BN y PL juntos.</i>	79
<i>Anexo 11: gráficos profundidad v/s τ_{ij} para cada elemento en los sitios BN. A, B y C corresponden al sitio BN1, D, E y F corresponden al sitio BN2 y G, H e I corresponden al sitio BN4. En (A) τ_{ij} para las LREE. En (B) τ_{ij} para las MREE. En (C) τ_{ij} para las HREE. En (D) τ_{ij} para las LREE. En (E) τ_{ij} para las MREE. En τ_{ij} (F) para las HREE. En τ_{ij} (G) para las LREE. En τ_{ij} (H) para las MREE. En (I) τ_{ij} para las HREE.</i>	80
<i>Anexo 12: gráficos profundidad v/s τ_{ij} para cada elemento en los sitios PL. A, B y C corresponden al sitio PL1, D, E y F corresponden al sitio PL3 y G, H e I corresponden al sitio PL4. En (A) τ_{ij} para las LREE. En (B) τ_{ij} para las MREE. En (C) τ_{ij} para las HREE. En (D) τ_{ij} para las LREE. En (E) τ_{ij} para las MREE. En τ_{ij} (F) para las HREE. En τ_{ij} (G) para las LREE. En τ_{ij} (H) para las MREE. En (I) τ_{ij} para las HREE.</i>	81
<i>Anexo 13: tabla con los contenidos de C total, C inorgánico, C orgánico y materia orgánica para cada muestra.</i>	82
<i>Anexo 14: tabla textura de suelo y clase textural, para las 26 muestras incluidas en este estudio.</i>	83
<i>Anexo 15: triángulo de clasificación clases texturales</i>	83

RESUMEN

Desde la década de los 90's se han perdido cerca de cuatro millones de hectáreas de bosque nativo a nivel mundial, al mismo tiempo, la cantidad de plantaciones forestales ha ido en aumento. La región del Biobío es una de las regiones que presenta un mayor reemplazo de bosque nativo por especies forestales como el *Pinus sp.* en Chile. Estudios revelan que estos cambios de uso de suelo (LUC) generan grandes variaciones en los ecosistemas y sobre todo en los suelos y sus nutrientes, lo que puede ser perjudicial para la naturaleza y la sociedad. Este estudio se enfoca en evaluar la influencia que tiene el cambio de uso de suelo de bosque nativo a plantaciones de *Pinus sp.* en la geoquímica de las tierras raras en el Parque Nacional Nonguén, específicamente, verificar si la pérdida de materia orgánica producto del cambio de uso de suelo provocaría una disminución del contenido de REE en los suelos.

Para llevar a cabo el estudio se seleccionaron 3 sitios bajo bosque nativo (BN) y 3 bajo plantaciones de *Pinus sp.* (PL), en estos se realizaron calicatas de ~170 cm de profundidad, y se realizó una descripción y toma de muestras por horizonte en cada perfil. Las muestras fueron analizadas mediante ICP-MS y los resultados analíticos se trabajaron estadísticamente para generar diagramas multielementos comparativos con el material parental. Además, se calcularon los coeficientes de transferencia de masa (τ_{ij}) para analizar el enriquecimiento o empobrecimiento de los suelos con respecto al material parental y se compararon los contenidos de materia orgánica en ambos sitios y las relaciones que presentan con las REE y con características físicas del suelo como la textura o la profundidad.

Los resultados dan cuenta que existen mayores diferencias entre los suelos desarrollados bajo una misma cobertura que los desarrollados bajo una cobertura diferente. Si bien se esperaba una reducción de las concentraciones de REE en los sitios de plantaciones dado a una reducción en sus contenidos de materia orgánica, ninguna de las dos cosas fue concluyente, ya que a pesar de que las plantaciones presentaran el sitio con los menores contenidos de REE y MO, también presentan los mayores contenidos del estudio en otro sitio. Pese a esto, se concluye que el cambio de uso de suelo influye en parámetros biofísicoquímicos (pH, MO, % arcillas) de los suelos que podrían controlar los contenidos de REE, sin embargo, factores como la topografía, geomorfología y procesos de erosión y depositación en el área de estudio podrían ser de gran influencia en las diferencias de contenidos de REE en los diferentes sitios.

1 INTRODUCCIÓN

El cambio de uso de suelo (*Land Use Change* en inglés, LUC) corresponde a modificaciones en el empleo de un terreno y su cubierta vegetal (Semarnat, 2010 en López y otros, 2015). El cambio de uso de suelo es un factor importante que puede impulsar cambios climáticos globales (Song y otros, 2018), incrementando además la vulnerabilidad de los ecosistemas (Lambin y otros, 2001) y alteraciones de los ciclos globales del agua y nutrientes (Vitousek y otros, 1997).

Desde 1990, se han perdido cuatro millones de hectáreas de bosque nativo primario a nivel global, mientras que, al mismo tiempo, ha aumentado el área de plantaciones de árboles exóticos (Cifuentes-Croquevielle y otros, 2020). El reemplazo de la vegetación y bosques nativos por monocultivos forestales provoca cambios en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Contreras, 2022). Estos cambios se deben principalmente a la reducción y alteración de la materia orgánica (MO), que está asociada a la composición y calidad de la vegetación (Contreras, 2022).

Diversos autores (Chen y otros, 2016; Crovo y otros, 2021; Cifuentes-Croquevielle y otros, 2020) han registrado reducciones de los nutrientes disponibles en suelos con reemplazo de bosque nativo por plantaciones, en que principalmente se registra una disminución del contenido de C y materia orgánica de los suelos (SOM). Específicamente, el estudio realizado por Crovo y otros (2021) reconoce estos patrones de reducción de nutrientes en la Cordillera de la Costa de Concepción sobre los mismos suelos considerados en este estudio, los cuales son derivados de material granítico.

Esta investigación se centra en estudiar las concentraciones de tierras raras en diferentes usos de suelo, particularmente el reemplazo de un bosque nativo secundario por plantaciones de *Pinus sp.* en el Parque Nacional Nonguén.

Particularmente, las tierras raras o *rare earth elements* (REE) son un grupo de 14 elementos (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) que poseen un comportamiento geoquímico similar. Estas se dividen en dos grupos según su número atómico y propiedades

geoquímicas y fisicoquímicas; tierras raras livianas (LREE; La-Eu) y tierras raras pesadas (HREE; Gd-Lu) (Bustos y otros, 2022).

En el marco de este proyecto de memoria, se busca realizar un análisis en la geoquímica de REE a través de un estudio detallado de características físico-químicas del suelo en relación a cada tipo de vegetación. Además, se tiene como objetivo determinar la influencia del uso de suelo en la geoquímica de REE al comparar suelos desarrollados bajo bosque nativo con suelos de plantaciones de pino.

Estudios previos (Han y Xu, 2021 y Han y otros, 2017) muestran una interacción entre las REE y la MO mediante la formación de complejos órgano-metálicos, estos estudios evidencian que los suelos que poseen un mayor contenido de carbono orgánico a su vez presentan mayores contenidos de REE. Específicamente, este estudio propone verificar que la pérdida de materia orgánica producto del cambio de uso de suelo de bosque nativo a plantaciones de pino provocaría una disminución del contenido de REE en los suelos del Parque Nacional Nonguén. Esta hipótesis fue previamente planteada en base al reconocimiento de un consistente empobrecimiento de REE en suelos agrícolas de Chile central (Castillo, 2019).

El área de estudio está ubicada en la Cordillera de la Costa, concretamente, dentro del Parque Nacional Nonguén, en la provincia de Concepción, región del Biobío, Chile, donde se establecieron 6 parcelas de estudio en el sendero Los Canelos, correspondientes a 3 parcelas de bosque nativo y 3 parcelas de antiguas plantaciones de pino. En estas se analizará los contenidos de REE totales en los diferentes horizontes del perfil de suelo y su relación con los contenidos de carbono orgánico y materia orgánica presentes en los suelos de ambos tipos de plantación.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Determinar la influencia del uso de suelo en la geoquímica de REE al comparar suelos desarrollados bajo bosque nativo con suelos de plantaciones de pino en el Parque Nacional Nonguén.

1.1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar la geoquímica de REE en los diferentes horizontes de suelos del Parque Nacional Nonguén.
- Determinar el comportamiento de REE por horizonte en ambos usos de suelo.
- Determinar los factores que controlan la distribución de REE en los suelos del Parque Nacional Nonguén.

1.1.3 Hipótesis

Este estudio propone verificar si existe una pérdida de materia orgánica producto del cambio de uso de suelo de bosque nativo a plantaciones de pino y si esta provoca una disminución del contenido de REE en los suelos del Parque Nacional Nonguén. Esta hipótesis fue previamente planteada en base al reconocimiento de un consistente empobrecimiento de REE en suelos agrícolas de Chile central (Castillo, 2019).

1.2 Ubicación y accesos

El estudio se llevó a cabo en la región del Biobío, Chile, específicamente en las dependencias del Parque Nacional Nonguén (3036,9 ha) ubicado en la provincia de Concepción (Figura 1.1). Se puede acceder al área de estudio a través del Parque Nacional Nonguén. Para acceder a este desde la carretera Panamericana, se debe ingresar a través de la ruta 146 en dirección hacia Concepción, posteriormente se debe ingresar a la calle Collao a través de la rotonda Palomares, luego se sigue por el Camino Nonguén y finalmente por la vía O-690 la cual termina en la entrada del parque. Una vez en este, se debe seguir los caminos internos del parque hasta llegar al área de estudio ubicada en el sector del sendero “Los Canelos”.

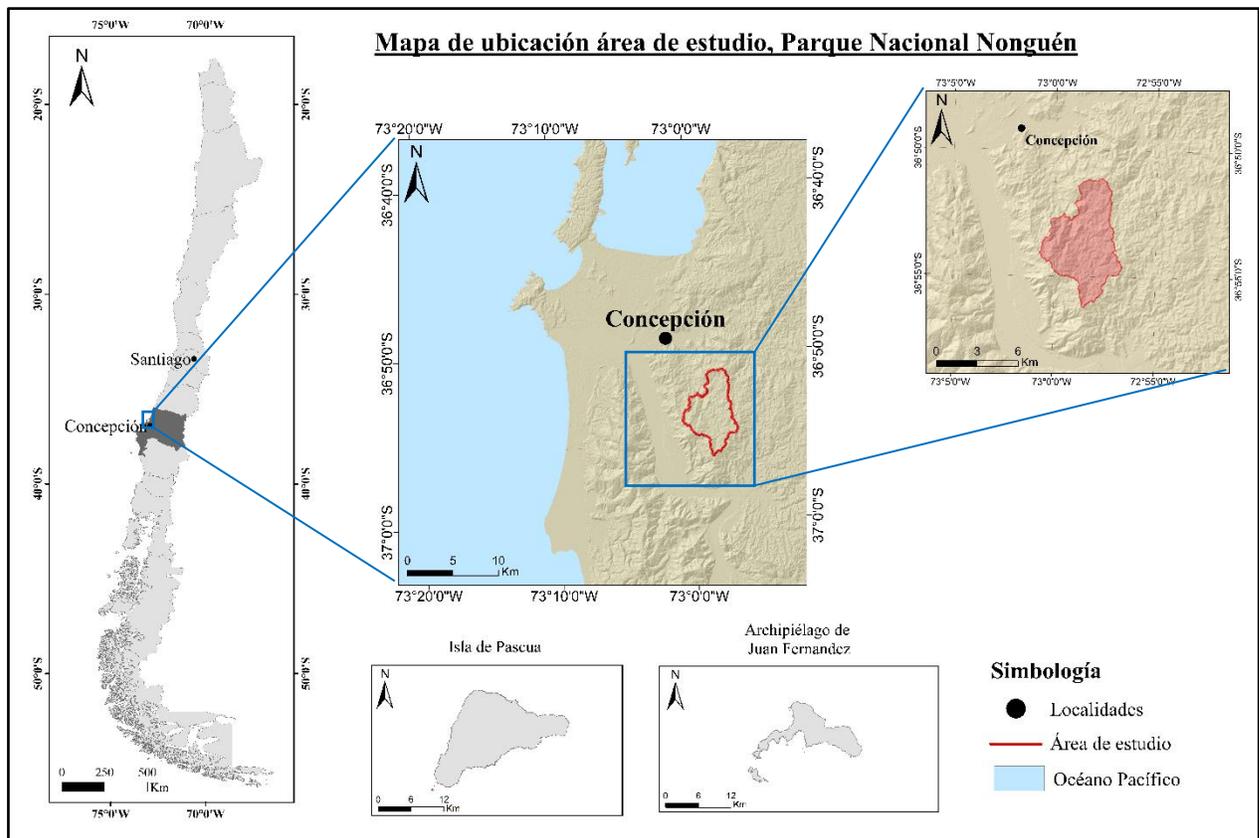


Figura 1.1: mapa de ubicación zona de estudio.

1.3 Trabajos previos

El área de la cuenca de Nonguén y el Parque Nacional Nonguén han sido diversamente estudiados por diferentes autores, esto debido principalmente a las características únicas que presentan con respecto a su flora nativa y su cercanía al área metropolitana de la ciudad de Concepción.

La geología del área es descrita en primera instancia por Galli (1967) en su trabajo “Geología Urbana y Suelo de Fundación de Concepción y Talcahuano, Chile.”, en este trabajo, describe la Formación Cosmito, que aflora dentro de la cuenca de Nonguén.

Aguirre y colaboradores (1972) en “Distribution of metamorphics facies in Chile an outline” define el Basamento metamórfico en el área de estudio, además describe sus características litológicas y su disposición respecto a otras unidades del área.

Creixell (2001), en su memoria de título “Petrología y Geotermobarometría de las Rocas Intrusivas de la Cordillera de la Costa entre los 36°30’ S y 38°00’ S”, detalla las características y la composición de las rocas intrusivas de la zona de Concepción, incluyendo rocas que afloran dentro del área de estudio.

Uno de los trabajos más importante realizados en el sector de Nonguén corresponde al estudio realizado por el instituto EULA en el año 2002, titulado “Zonificación del fundo Nonguén”, el cual describe las principales características del Fundo Nonguén, en este se detalla los diferentes usos, la geomorfología y la geología del sector.

Ramírez (2004), en su tesis titulada “Estudio geológico ambiental de la cuenca del estero Nonguén”, caracteriza la cuenca del Estero Nonguén, considerando la geología, hidrogeología, geomorfología y los usos y coberturas de suelos.

Correa-Araneda y Salazar (2014), en su estudio se centran en una caracterización fisicoquímica del Estero Nonguén, donde buscan establecer una relación de las características del agua en función de los cambios de uso de suelo, estos cambios relacionados principalmente a una intervención antrópica.

CONAF (2019) en su informe “Plan de manejo de la Reserva de Nonguén” describe la relevancia del actual Parque Nacional Nonguén, destacando sus atributos únicos en lo que refiere a la gran biodiversidad que presenta, además describe las características del sector y la importancia de su protección.

Contreras (2022), en su memoria de título “Efectos de coberturas y usos de suelo en la meteorización a partir del estudio de elementos traza y $\delta^{7}\text{Li}$ en sedimentos en suspensión y aguas en la Cuenca de Nonguén, Concepción, región del Biobío”, estudia la relación que existe entre los cambios de cobertura y usos de suelo y la meteorización y erosión de los suelos, además de identificar las modificaciones que producen estos cambios en las propiedades del agua y sedimentos.

2 MARCO GEOLÓGICO

2.1 Geomorfología

En la región del Biobío, Börgel (1983) reconoce cinco unidades morfoestructurales, de W a E son: Planicies Litorales, Cordillera de la Costa, Depresión Intermedia, Precordillera y Cordillera Andina. El área de estudio ubicada en la cuenca de Nonguén se encuentra inserta en la Cordillera de la Costa, la cual se compone principalmente por rocas graníticas y metamórficas (Hervé y otros, 1988).

Geomorfológicamente la cuenca de Nonguén comprende dos tipos de relieve; los relieves de erosión, representados por cordones y plataformas en diferentes niveles, y los relieves de acumulación se presentan como valles locales y llanuras aluviales (EULA, 2002; Figura 2.1). La cuenca de Nonguén es principalmente montañosa, por lo que cerca del 90% de la superficie corresponden a relieves en altura (cordones y plataformas), mientras que el 10% restante es ocupado por relieves bajos (llanura fluvial y valles actuales; Contreras, 2022). En la Tabla 1 se presentan el área y porcentaje que ocupa cada forma de relieve dentro de la cuenca.

Tabla 2.1: unidades geomorfológicas de la cuenca del río Nonguén. Extraído de EULA (2002)

Tipos de relieve	Unidades de relieve	Superficie (ha)	%
Relieves de erosión	Cordones graníticos < 300	1.465	27,7
	Cordones graníticos > 300	3.197	60,5
	Plataformas graníticas 1	137	2,6
	Plataformas graníticas 2	111	2,1
Relieves de acumulación	Llanura y valles aluvial	281	5,3
	Relleno artificial	80	1,5
Procesos geomorfológicos	Derrumbes activos	16	0,3
TOTAL		5.287	100

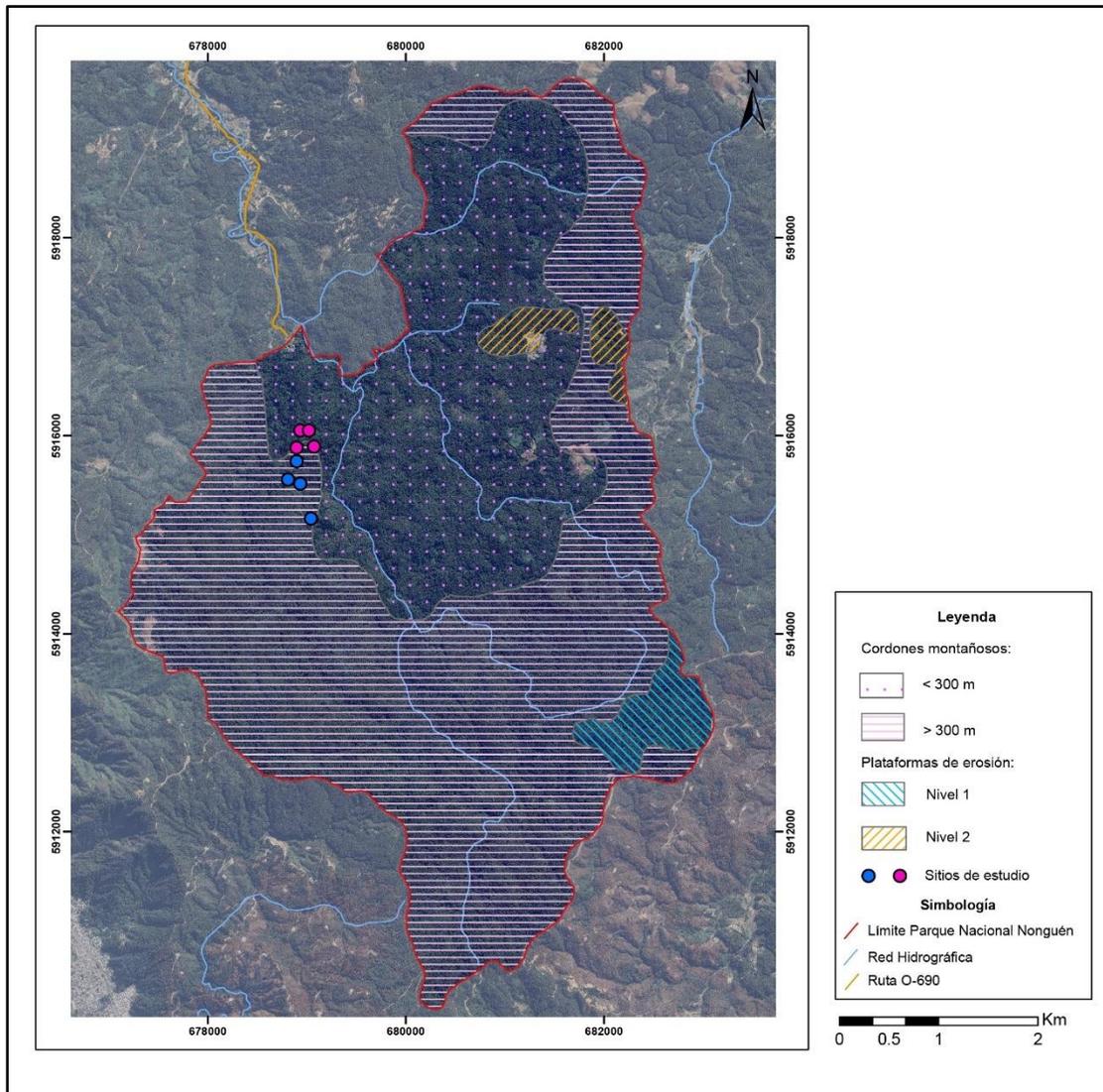


Figura 2.1: mapa geomorfológico del área de estudio. Extraído de Aguilar (2024).

2.1.1 Cordones graníticos

Los cordones graníticos ocupan un 88% de la superficie total de la cuenca de Nonguén, por lo que corresponden a los relieves dominantes del área. En general las pendientes de estas unidades oscilan entre un 20% a un 36%, correspondiendo a pendientes moderadas a fuertes. Estos cordones se presentan en dos niveles de altitud (EULA, 2002):

- Nivel Superior: Se desarrolla en el sector sur y sureste de la cuenca. Los cordones graníticos superan los 300 m s.n.m (EULA, 2002). En estos predominan rocas del basamento metamórfico paleozoico, principalmente esquistos y pizarras. Las rocas en general se

encuentran altamente fracturadas y meteorizadas y de manera local se observan afloramientos con roca inalterada (Ramírez, 2004).

Los cordones montañosos en este nivel exhiben una estabilidad significativa, esta se atribuye principalmente a sus gradientes topográficos moderados y a la presencia de una cubierta boscosa de alta densidad que supera el 75%. Esta masa vegetal ejerce una función amortiguadora, aislando eficazmente el suelo de los impactos resultantes de las precipitaciones (EULA, 2002; Ramírez, 2004).

- Nivel Inferior: Se desarrolla en el sector norte y noreste de la cuenca en altitudes que rondan los 200 a 250 m s.n.m (EULA, 2002), se caracterizan por presentar pendientes moderadas a fuertes y se emplazan por sobre rocas intrusivas del Batolito Costero del sur. Estas rocas, de composición granítica, exhiben una notable acumulación de suelos residuales in situ, caracterizados principalmente por la presencia de arcillas y cuarzo, en estos se pueden identificar rastros de su textura original. Además, estos suelos, debido a su bajo grado de compactación, manifiestan una alta vulnerabilidad ante las condiciones meteorológicas, facilitando los procesos erosivos. En general en este nivel prevalecen las pendientes moderadas, sin embargo, las quebradas se destacan por presentar escarpes profundos con pendientes pronunciadas a abruptas. (Ramírez, 2004).

2.1.2 Plataformas graníticas

Las plataformas graníticas corresponden a relieves altos, estos se presentan en altitudes por sobre los 200 ms.n.m. y se extienden por alrededor de un 7% de la superficie de la cuenca de Nonguén. Estos tipos de relieve de erosión en general muestran pendientes moderadas que no superan el 20% y al igual que los cordones graníticos se presentan en dos niveles de altitud (EULA,2002).

- Nivel superior: Los relieves más altos se encuentran presentes en el sur de la cuenca con altitudes que incluso superan los 300 ms.n.m. y se han desarrollado principalmente sobre suelos y rocas de origen metamórfico (Ramírez, 2004).

- Nivel Inferior: Estos relieves con alturas que oscilan los 200 a 300 ms.n.m se ubican principalmente al norte de la cuenca y se han desarrollado sobre suelos y rocas de origen granítico correspondientes al Batolito Costero del Sur (Ramírez, 2004).

Debido a las características morfológicas y a las relativamente bajas pendientes que presentan, este tipo de relieve ha sido utilizado principalmente en actividades agrícolas y forestales, además, presentan un manto de roca alterada en superficie, por lo que son altamente vulnerables a los procesos erosivos (EULA,2002).

2.1.3 Llanuras y valles aluviales

Según el estudio realizado por el centro de investigación EULA (2002), el valle inferior del río Nonguén, forma parte de la llanura aluvial del río Andalién, y a su vez corresponde a un estrecho valle influenciado por los aportes sedimentarios provenientes de los cordones graníticos de la Cordillera de la Costa. Estos depósitos detríticos fueron identificados por Galli (1967), quien los caracterizó y asignó como la unidad Arenas Andalién. Estas arenas son generadas por los diversos procesos de meteorización y erosión, que específicamente en este sector afectan a las formaciones graníticas de la Cordillera de la Costa. Con respecto a su morfometría, estas áreas corresponden a llanuras de baja pendiente con gradientes inferiores al 2% y altitudes que rondan los 10 ms.n.m. (EULA, 2002).

Los valles aluviales, corresponden a los fondos de valle locales. Estos valles se caracterizan por su estrechez, con longitudes inferiores a 500 metros. Estos valles cumplen un rol esencial como áreas receptoras naturales para los depósitos coluviales que descienden de las laderas circundantes. Estos sedimentos se incorporan a los cursos de agua como partículas en suspensión para luego depositarse en los mismos valles formando una gruesa capa de maicillo, compuesta principalmente por arenas cuarcíferas de granulometría media a gruesa. Morfométricamente, estos valles mantienen pendientes por debajo del 2%, presentando una topografía de tipo regular a plana (EULA, 2002).

Tanto los valles como las llanuras aluviales se presentan en un bajo porcentaje de superficie en la cuenca, pese a esto, adquieren una gran relevancia, ya que son los únicos sectores planos dentro de una cuenca que se caracteriza principalmente por presentar relieves montañosos.

2.2 Geología

El estudio realizado por el centro de investigación EULA (2002) dentro del área de estudio, reconoce tres unidades geológicas principales (Figura 2.2):

- Basamento Metamórfico, el cual en el área de estudio se compone principalmente por rocas de la Serie Oriental.
- Intrusivos graníticos Paleozoicos, pertenecientes al Batolito Costero del Sur. Estos en el área de estudio fueron definidos por Creixell (2001) como Granitoides Concepción.
- Sedimentos de valles recientes de edad Holocena.

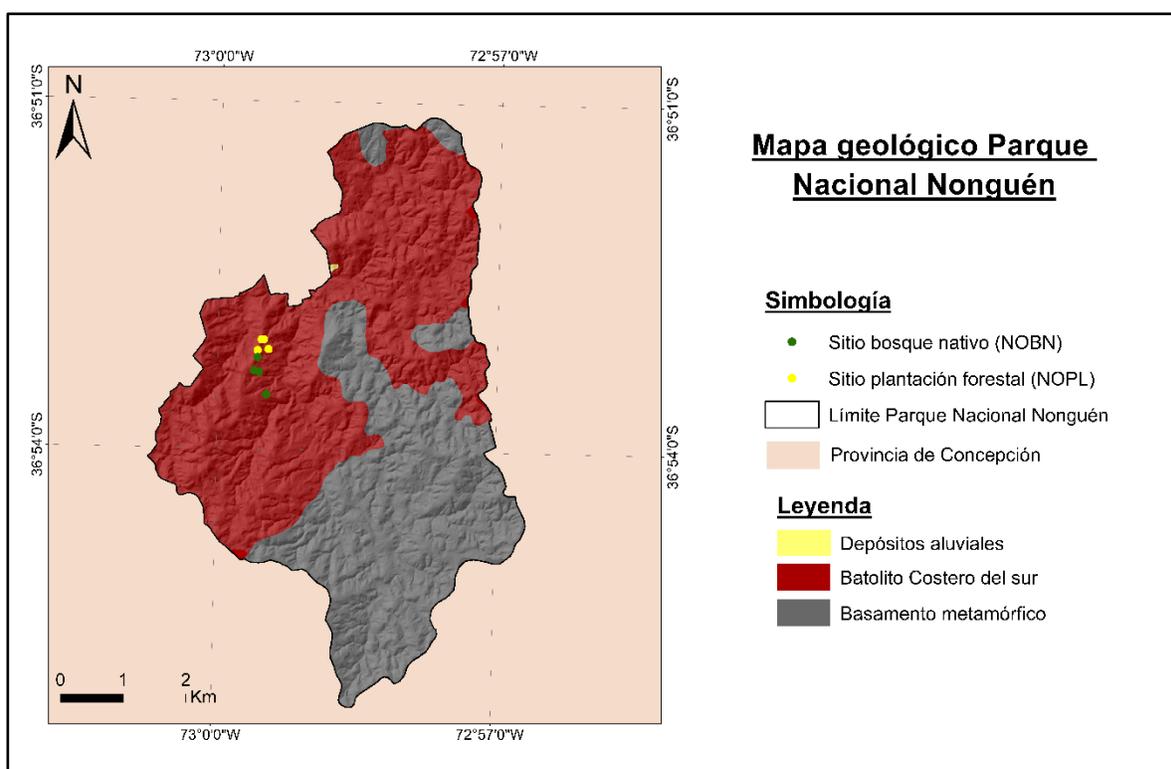


Figura 2.2: mapa geológico área de estudio, modificado de Ramírez (2004).

2.2.1 Basamento Metamórfico

Definido por Aguirre y colaboradores (1972), corresponde a un cinturón de rocas metamórficas del Carbonífero inferior distribuidas principalmente a lo largo del borde occidental de la Cordillera de la Costa entre los 34°S y los 41°S con una longitud aproximada de 880 km. El Basamento Metamórfico está conformado por dos franjas paralelas con dirección N-S en donde se reconocen dos series principales: Serie Occidental, compuesta de

micaesquistos, metabasitas y metacherts y la Serie Oriental, compuesta por metapelitas, filitas y rocas córneas (Aguirre y otros, 1972).

En la cuenca de Nonguén, las rocas metamórficas que afloran pertenecen a la Serie Oriental y se encuentran localizadas al S y E del parque, en los cordones montañosos con alturas superiores a 200 m s.n.m, además en algunos sectores de la cuenca se encuentra en contacto por intrusión con los granitoides del Batolito Costero del Sur (Ramírez, 2004; Bernard, 2023).

2.2.1.1 Serie Oriental

La Serie Oriental es parte del cinturón de rocas metamórficas ubicado a lo largo de la Cordillera de la Costa centro-sur de Chile (Aguirre y otros, 1972), Desde la latitud 32°30' S hasta aproximadamente los 38° S, se pueden encontrar afloramientos continuos de la Serie Oriental. Sin embargo, al sur de los 38° S, en la Cordillera de la Costa, estos afloramientos de la Serie Oriental están ausentes (Creixell, 2001). Solo podemos observarlos de manera esporádica en la región pre-andina, específicamente al sur de los 39° S, en un área que se extiende entre los lagos Calafquén y Ranco (Martin y otros, 1999).

Las rocas de la Serie Oriental se caracterizan por presentar un metamorfismo de bajo grado, es decir procesos ocurridos a bajas presiones y altas temperaturas. Su litología está compuesta principalmente por metapelitas intercaladas con metareniscas y en menor grado con rocas córneas. El grado de metamorfismo varía desde la facies de esquistos verdes hasta facies granulitas en la proximidad con el Batolito Costero del sur (Hervé, 1977).

Según lo descrito por Ramírez (2004), las rocas de esta serie que afloran en la cuenca de Nonguén son intruidas por rocas graníticas pertenecientes al Batolito Costero presente en el sector, con afloramientos ubicados principalmente en la vertiente occidental de la subcuenca del estero Manquimávida. Además, estas se encuentran sobreyacidas por la Formación Cosmito y por depósitos sedimentarios cuaternarios.

2.2.2 Batolito Costero del Sur (BCS)

Definido por Hervé y otros (1987), el Batolito Costero del Sur es un cuerpo plutónico calcoalcalino emplazado en una franja con dirección NNE-SSW que aflora continuamente

en la Cordillera de la Costa centro-sur desde los 32°30'S y los 38°S al este de las rocas del Basamento Metamórfico Paleozoico. Al sur de los 38° estas rocas intrusivas Paleozoicas afloran de manera esporádica en la región de Los Lagos entre los 39°S y 41°S (Martín y otros, 1999).

Las rocas del batolito tienen una edad que va del Carbonífero al Pérmico (Creixell, 2001) y corresponden principalmente a tonalitas de hornblenda y biotita y granodioritas (Hervé y otros, 1987). Además, presenta una zonación lateral en las que las rocas ya mencionadas forman parte del centro del batolito y hacia los márgenes dominan rocas de una composición más diferenciada, como pueden ser algunos cuerpos pegmatíticos y granitos de biotita y muscovita (Creixell, 2001).

El BCS intruye a la Serie Oriental del Basamento Metamórfico, generando en ella tres zonas de metamorfismo de contacto: zona de andalucita, silimanita y biotita (Creixell, 2001). El grado de metamorfismo aumenta hacia las cercanías del contacto con los intrusivos. Evidencias tanto geocronológicas como texturales sugieren que la intrusión del batolito fue contemporánea al segundo episodio de deformación sufrida por las rocas de la Serie Oriental (Hervé, 1987; Creixell, 2001).

2.2.2.1 Granitoides Concepción (GC)

Definidos por Creixell (2001), los Granitoides Concepción son una subunidad del Batolito Costero del sur que se distribuye entre el sector norte de la ciudad de Concepción y la localidad de Hualqui por el sur. Se encuentra limitado al oeste por el río Biobío y al este no ha sido localizado su límite. Esta unidad se encuentra intruyendo a las rocas del basamento metamórfico, específicamente a la Serie Oriental (Creixell, 2001). La litología predominante corresponde a monzogranitos de biotita y en menor proporción a tonalitas de biotita y micas blancas, las litologías presentan una textura fanerítica y un tamaño de grano que va de medio a grueso.

Esta unidad se distribuye en forma continua en el borde occidental de la Cordillera de la Costa y en cerros isla ubicados en la llanura de Concepción (Ramírez, 2004). Según lo anterior es posible encontrar esta unidad presente a lo largo de la cuenca de Nonguén y por ende en el área donde se centra este estudio (Figura 2.2). En general en el área de estudio son

pocos los afloramientos y además, los sitios están ubicados principalmente sobre depósitos coluviales de material granítico.

Ramírez (2004) en la cuenca de Nonguén define principalmente las litologías como tonalitas y monzogranitos, con algunos granitos y diques máficos con abundante biotita. Sin embargo, en general los afloramientos corresponden a suelos residuales principalmente de origen granítico que presentan una abundante presencia de cuarzo y conservan características texturales de los minerales originales, en particular de los feldespatos, los que se encuentran alterados a arcillas. Debido a este fenómeno, se identifica al resultado de la alteración de las rocas graníticas con el término "maicillo".

2.2.3 Sedimentos de Valles Actuales

Los Sedimentos de Valles Actuales son de edad Holocena y corresponden a las llamadas Arenas Andalién. Definidas por Galli (1967) esta unidad se compone principalmente por arenas finas con limos y arcillas no consolidadas, que se forman por el transporte de sedimento de material proveniente de los cordones graníticos adyacentes a través de los ríos y esteros existentes en el área. Son de textura arcillosa y limosa, típica de los procesos de sedimentación (EULA, 2002).

2.3 Geología Estructural

A modo general en el área de Concepción-Talcahuano, Galli (1967) infiere la presencia de numerosas fallas normales de alto ángulo que afectan tanto al basamento paleozoico como a la cobertura mesocenoica del área. Estas fallas delimitan bloques, algunos de los cuales son descendidos y otros basculados, generando así cuencas estructurales (Quezada, 1996; Ramírez, 2004).

Ramírez 2004, en su estudio reconoce en la cuenca de Nonguén diversos lineamientos con orientaciones preferenciales NNE-SSW que coinciden con laderas de fuertes pendientes, con el desarrollo de quebradas y con drenes de tercer y cuarto orden de la red hidrográfica. Además, dada la extensa cobertura vegetal y la intensa meteorización y alteración que presentan las rocas, no es posible reconocer planos de falla o indicadores cinemáticos que permitan determinar a qué tipo de estructura pertenecen estos lineamientos.

3 MARCO TEÓRICO

3.1 Suelo

Los suelos son esenciales para la vida en nuestro planeta. En gran medida, la calidad del suelo determina la naturaleza de los ecosistemas vegetales y su capacidad para mantener la vida animal y la sociedad humana. Los suelos desempeñan un papel central en diversos desafíos medioambientales actuales, como la contaminación del agua, el cambio climático, la pérdida de biodiversidad y la seguridad alimentaria. Estos procesos que ocurren en el suelo tienen efectos significativos en los diferentes ecosistemas a nivel global (Weil y Brady, 2017).

Weil y Brady (2017) en su libro entregan dos definiciones de suelo:

1. Un cuerpo natural dinámico compuesto por sólidos minerales y orgánicos, gases, líquidos y organismos vivos que puede servir como medio para el crecimiento de las plantas.
2. El conjunto de cuerpos naturales que a lo largo del tiempo ocupan partes de la superficie de la Tierra y son capaces de sostener el crecimiento de las plantas, con propiedades resultantes de los efectos integrados del clima, los organismos vivos que actúan sobre el material original y que están condicionados por la topografía.

Phillips (2017) plantea que la formación y desarrollo del suelo se ve influenciada por dos tipos de factores: los factores extrínsecos, que provienen del entorno exterior al suelo, como el clima, la biota, la topografía, el material original y el tiempo; y los factores intrínsecos, que se refieren a los procesos y fenómenos que ocurren dentro del suelo en sí.

Estas relaciones intrínsecas del suelo pueden manifestarse de dos maneras: pueden ser estables, lo que significa que el suelo se desarrolla de manera constante y predecible a lo largo del tiempo, o pueden ser inestables, lo que implica que el proceso de formación del suelo es más variable y sujeto a cambios impredecibles (Weil y Brady, 2017). Ambos tipos de factores ya sean extrínsecos o intrínsecos, desempeñan un papel esencial en los procesos pedogenéticos.

3.1.1 Horizontes de suelo

Cada ubicación en la superficie terrestre experimenta una combinación única de influencias de los principales factores de la formación del suelo (clima, material parental, topografía, organismos), lo que resulta en la formación de horizontes específicos y la creación gradual de cuerpos naturales de suelo. Cada suelo se caracteriza por una secuencia particular de estos horizontes, a su vez un despliegue vertical de esta secuencia es conocida como perfil de suelo (Figura 3.1; Weil y Brady, 2017).

Por lo general, son reconocidos seis horizontes principales dentro del perfil de suelo y son designados con las letras O, A, E, B, C y R (Figura 3.1). Dentro de los horizontes principales pueden presentarse subhorizontes, los que se designan con letras minúsculas siguiendo a la letra mayúscula del horizonte principal, por ejemplo, Bt, Ap u Oi (Weil y Brady, 2017).

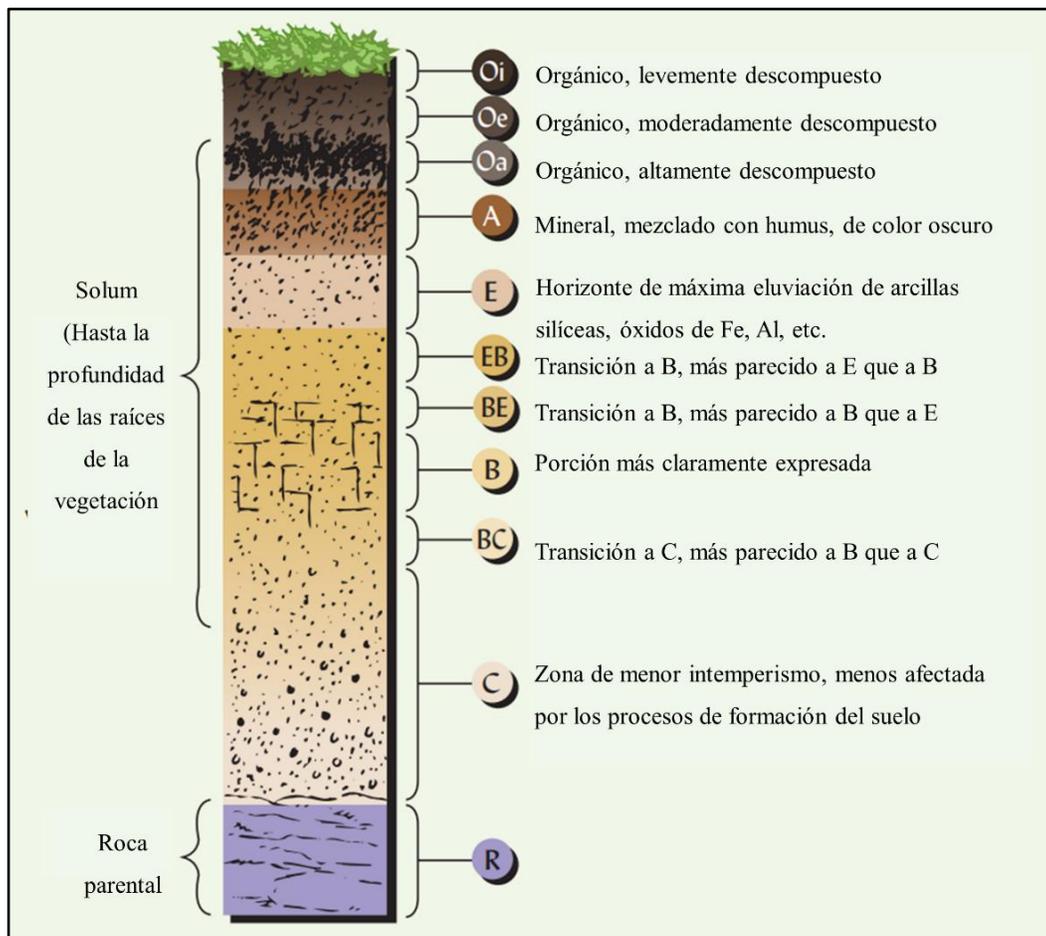


Figura 3.1: perfil de suelo con sus respectivos horizontes. Modificado de Weil y Brady (2017).

Weil y Brady (2017), describen los horizontes nombrados anteriormente de la siguiente manera:

- Horizonte O: corresponde a horizontes orgánicos, estos se forman principalmente por encima del suelo mineral en perfiles de suelo orgánico y provienen de restos de plantas y animales. Estos horizontes se encuentran típicamente en áreas boscosas y se pueden distinguir tres subhorizontes diferentes (parte superior de Figura 3.1):
 - Horizonte Oi: corresponde a materiales fibricos ligeramente descompuestos que incluyen restos reconocibles de plantas y animales.
 - Horizonte Oe: corresponde a materiales hémicos, con residuos finamente fragmentados y parcialmente descompuestos, con una cantidad apreciable de fibras.
 - Horizonte Oa: corresponde a materiales sápricos altamente descompuestos, suaves y amorfos, que carecen de fibras y estructuras de tejido reconocibles.
- Horizonte A: es el horizonte mineral superior, estos suelen contener materia orgánica parcialmente descompuesta que le dan un color más oscuro al de los horizontes inferiores. En suelos de textura media, estos horizontes poseen una textura más gruesa debido a la pérdida de material fino por translocación a horizontes inferiores o por erosión.
- Horizonte E: estos horizontes son las zonas de máxima lixiviación o eluviación de arcillas, óxidos de hierro y aluminio, esto deja minerales resistentes como el cuarzo en las fracciones de arena y limo. Se encuentran generalmente debajo de los horizontes A y son más claros en color que los horizontes circundantes. Son comunes en suelos de bosques y, en ocasiones, se sitúan directamente bajo los horizontes O.
- Horizonte B: se encuentran debajo de los horizontes O, A o E y han experimentado cambios significativos durante la formación del suelo, lo que hace que la estructura original del material parental sea indistinguible. En muchos horizontes B, los materiales se acumulan debido a la iluviación, un proceso de lavado desde los horizontes superiores. En regiones húmedas, los horizontes B son áreas de acumulación máxima de materiales como óxidos de hierro, aluminio y arcillas silicatadas (horizontes Bt), algunos de los cuales provienen de horizontes superiores y otros se forman en su lugar.
- Horizonte C: el horizonte C es el material suelto que se encuentra debajo del solum (horizontes A y B). Este puede o no provenir del mismo material parental a partir del cual se formó el solum. El horizonte C se sitúa por debajo de las zonas de mayor actividad

biológica y no ha sido alterado lo suficiente durante la pedogénesis como para calificar como un horizonte B. El material del horizonte C retiene algunas de las características estructurales de la roca parental o los depósitos geológicos a partir de los cuales se formó. Sus capas superiores pueden con el tiempo convertirse en parte del solum a medida que continúa la meteorización y la erosión.

- Horizonte R: este horizonte corresponde a roca consolidada que presenta poca evidencia de meteorización (parte inferior de la Figura 3.1).

3.2 Coberturas y usos de suelos

La naturaleza del suelo en una región específica está intrínsecamente vinculada a la cobertura vegetal presente, ya que esta cumple un papel fundamental como escudo protector contra diversos procesos erosivos. Los cambios en las coberturas y usos del suelo no solo transforman la apariencia de la superficie terrestre, sino que también alteran la dinámica de los procesos morfogenéticos y pueden provocar la pérdida de suelo. Esto se potencia en áreas donde la actividad agrícola, forestal y la expansión urbana tienen un impacto significativo (Ramírez, 2004). Estas actividades son ejemplos claros de cómo el uso del suelo puede afectar tanto la cobertura vegetal como la estabilidad del suelo, lo que tiene repercusiones en el entorno geocológico circundante.

Es por lo anterior que es fundamental comprender las diferencias que existen entre los conceptos de cobertura terrestre y uso de suelo, ya que estas definiciones a menudo se entrelazan y confunden. Si bien son conceptos similares, presentan diferencias. La cobertura terrestre, conocida como 'land cover' en inglés, se refiere a la cobertura biofísica observada en la superficie terrestre (Di Gregorio y Jansen, 1998). Incluyendo los atributos de la superficie y la subsuperficie inmediata de la Tierra, considerando aspectos como la biota, el suelo, la topografía y el agua superficial y subterránea (Lambin y Geist, 2006).

Por otro lado, el uso del suelo, denominado '*land use*' en inglés, se enfoca en los propósitos con los cuales los seres humanos explotan y modifican la cobertura terrestre. Esto no solo incluye la forma en que se manipulan los atributos biofísicos de la tierra, sino también el propósito o la finalidad detrás de dicha manipulación (Lambin y Geist, 2006). En otras

palabras, el uso del suelo establece un vínculo directo entre la cobertura terrestre y las acciones antrópicas en su entorno (Di Gregorio y Jansen, 1998).

En el área de estudio se encuentra uno de los últimos relictos de bosque nativo caducifolio de la Cordillera de la Costa, siendo esta la principal cobertura/uso presente en la zona. No obstante, los sitios de plantaciones, al ser plantaciones antiguas han sido recolonizadas por vegetación nativa, generando una cobertura mixta (Figura 3.2).

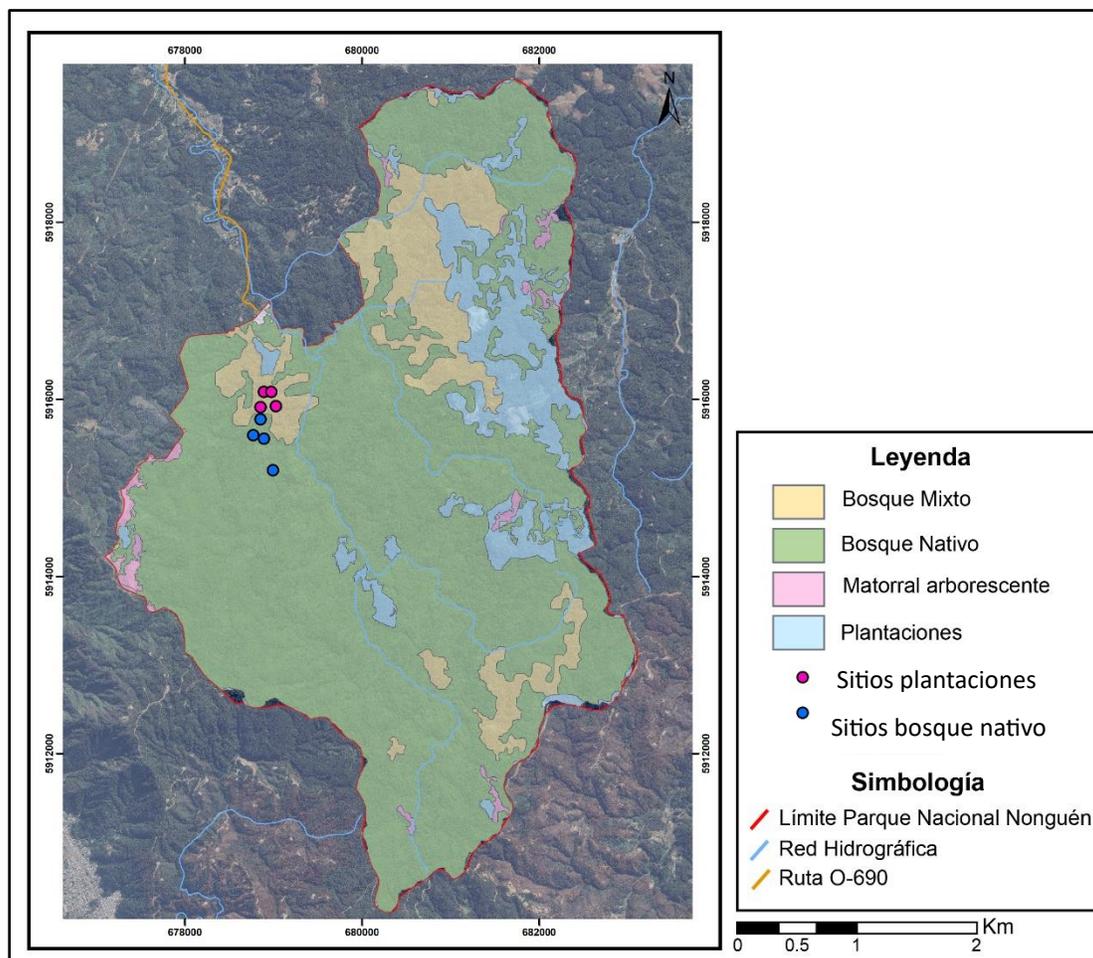


Figura 3.2: mapa de cobertura de suelo Parque Nacional Nonguén. Extraído de Aguilar (2024).

3.3 Tierras raras

3.3.1 Generalidades

Los elementos de tierras raras (REE, por sus siglas en inglés) son un grupo de 17 elementos (Anexo 1) con características fisicoquímicas similares, según la *International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC). De estos elementos, 15 pertenecen al grupo de los

lantánidos, las REE tienen números atómicos que van desde el 57 hasta el 71, estos incluyen lantano (La), cerio (Ce), praseodimio (Pr), neodimio (Nd), prometio (Pm), samario (Sm), europio (Eu), gadolinio (Gd), terbio (Tb), disprosio (Dy), holmio (Ho), erbio (Er), tulio (Tm), iterbio (Yb) y lutecio (Lu) (Ramos y otros, 2016). Además, se suman a este grupo el escandio (Sc) e itrio (Y), dos elementos que presentan características geoquímicas similares a las del grupo de los lantánidos (Bustos y otros, 2022). Sin embargo, algunos expertos excluyen el escandio (Sc) de este grupo, debido a su pequeño radio iónico, lo que facilita su sustitución con Mg, Fe²⁺, Zr y Sn, por lo que rara vez se encuentra en los mismos minerales que las demás REE (Berrocal, 2021).

De los lantánidos, 14 elementos ocurren de forma natural (Laveuf y Cornu, 2009), siendo el prometio (Pm) un elemento que se produce artificialmente como un subproducto de las reacciones de fisión del uranio y, por lo tanto, es radiactivo. Sin embargo, se han registrado cantidades mínimas de prometio en la naturaleza (aproximadamente 10-18 partes por millón en la corteza terrestre). Esta baja presencia se debe a que el prometio carece de isótopos estables; su isótopo más estable, el ¹⁴⁵Pm, tiene una vida media de 17,7 años (Elkina y Kurushkin, 2020).

3.3.2 Clasificación según su peso atómico

Las REE se dividen en dos grupos según su peso atómico y propiedades geoquímicas y fisicoquímicas; tierras raras livianas (*light rare earth elements*, LREE) que incluyen los lantánidos de bajo número atómico desde el lantano (La) hasta el europio (Eu), donde además se incluye el escandio (Sc) y las tierras raras pesadas (*heavy rare earth elements*, HREE) que incluyen los lantánidos de mayor número atómico desde el gadolinio (Gd) hasta el lutecio (Lu; Bustos y otros, 2022), también en este grupo se incluye el itrio (Y) dado que su radio atómico es casi idéntico al del holmio (Ho), y posee la misma carga (+3) (Berrocal, 2021). Sin embargo, en ocasiones autores distinguen hasta tres grupos de elementos de tierras raras agregando a las anteriormente nombradas, las tierras raras medianas (*medium rare earth elements*, MREE). No obstante, esta distinción puede variar según el autor. En términos generales, los estudios asignan las LREE desde La hasta Pr o Nd, las MREE desde Pr o Nd hasta Dy o Ho, y las HREE desde Dy o Ho hasta Lu (Laveuf y Cornu, 2009).

Para efectos de este trabajo se considerará la división de las REE en tres grupos. Donde las REE livianas se considerarán desde el La-Nd (La, Ce, Pr, Nd), las REE medianas desde el Sm-Ho (Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho) y las REE pesadas desde el Er-Lu (Er, Tm, Yb, Lu), lo anterior basándose parcialmente en la división propuesta por Castillo (2019). Además, no se considerarán el escandio (Sc) y el itrio (Y) para el análisis de los resultados.

3.3.3 Abundancia

Con respecto a la abundancia relativa (Figura 3.3) las REE siguen el patrón característico del principio de Oddo-Hakins en forma de “zigzag” que indica una mayor abundancia de los elementos con número atómico par en comparación con los de número atómico impar.

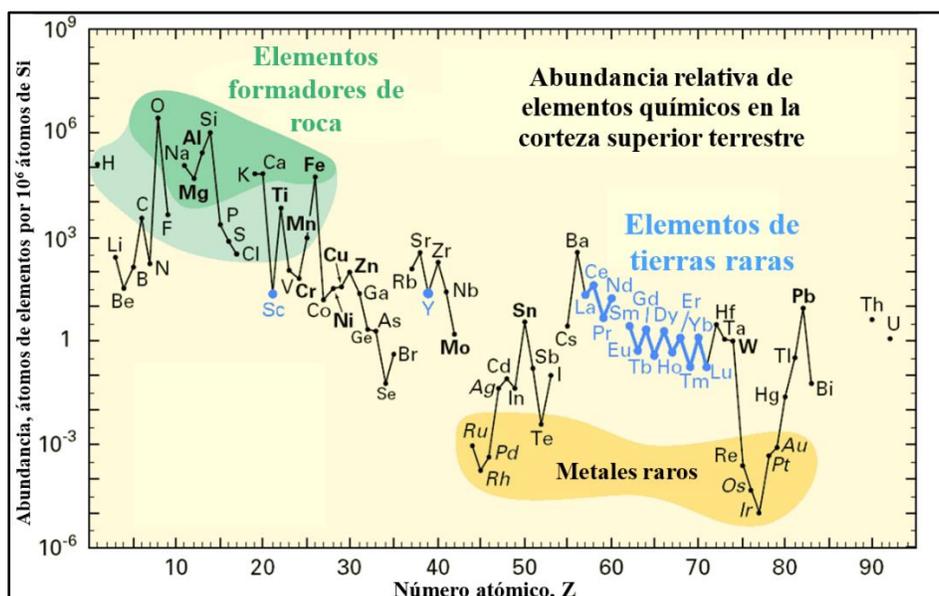


Figura 3.3: abundancia relativa de elementos químicos en la corteza superior terrestre. Modificado de USGS, *Rare Earth Elements - Critical Resources for High Technology* (2002).

Si bien se les conoce como tierras raras, las REE no son tan “raras” o “escasas” como se podría suponer. En realidad, el cerio (Ce) e itrio (Y), por ejemplo, son más abundantes en masa (25% y 30% respectivamente) que los metales preciosos (Chakhmouradian y Wall, 2012). En cambio, en el Sistema Solar, la mayoría de los lantánidos con números atómicos impares son menos abundantes que el 94% de los demás elementos, lo que incluye a metales preciosos como el oro (Au) y el platino (Pt) (Chakhmouradian y Wall, 2012). Esto respalda

la noción de que, al menos en cierta medida, algunos de los elementos de tierras raras se pueden considerar "raros" o "escasos" en una perspectiva cósmica.

3.3.4 Propiedades

Los elementos del grupo de las tierras raras se caracterizan principalmente por presentar una valencia de +3 en su estado de oxidación, conformando un grupo homogéneo en este sentido, a excepción del Eu y el Ce, que pueden presentar otros estados de valencia, el europio puede presentarse como Eu^{2+} y el cerio como Ce^{4+} , ampliando la diversidad de estados de oxidación dentro del grupo. Además, debido a sus radios iónicos y propiedades fisicoquímicas similares, estos elementos tienen la capacidad de sustituirse mutuamente en diversas estructuras cristalinas, dando lugar a la coexistencia de múltiples elementos de este grupo en un solo mineral (Alarcón, 2019).

4 METODOLOGÍA

La metodología empleada en la realización de esta tesis se divide en tres etapas. La primera etapa se centra en el trabajo de terreno y toma de datos y muestras realizado durante los años 2021 y 2022, lo anterior previo al inicio de la realización de esta tesis. La segunda etapa se dedica a la recopilación bibliográfica y trabajo de laboratorio, y la tercera etapa se enfoca en el análisis de datos. Cada una de estas etapas se detalla a continuación para proporcionar una visión general del proceso de investigación de este trabajo.

4.1 Primera etapa

4.1.1 Etapa de terreno

Esta etapa contempla salidas a terreno para el reconocimiento del área de estudio y visita de los sitios donde se realizaron las calicatas, lo anterior se llevó a cabo durante los meses de julio y agosto del presente año. Además, se tomaron muestras de agua de poros en suelos, pero estas muestras no serán consideradas para este trabajo.

La primera etapa corresponde a una etapa de terreno realizada por el equipo de investigación del Proyecto de cooperación internacional MPG 190022, denominado “*Forest Carbon Associative Research: Quantifying the effect of forest use intensification on soil carbon stabilization processes*”, y del proyecto VRID InvestigadorAS “Efecto del cambio de uso de suelo en la geoquímica de la Cuenca de Nonguén y su impacto en la meteorización química”, esta etapa de terreno se realizó durante el período 2021-2022, en donde se realizaron campañas de terreno enfocadas en:

- Realizar un reconocimiento geológico del área de estudio y selección de sitios.
- Realizar calicatas en los sitios de estudio dentro del área de Nonguén.
- Caracterizar y muestrear los perfiles de suelos de las calicatas según horizontes genéticos (Figura 4.1).

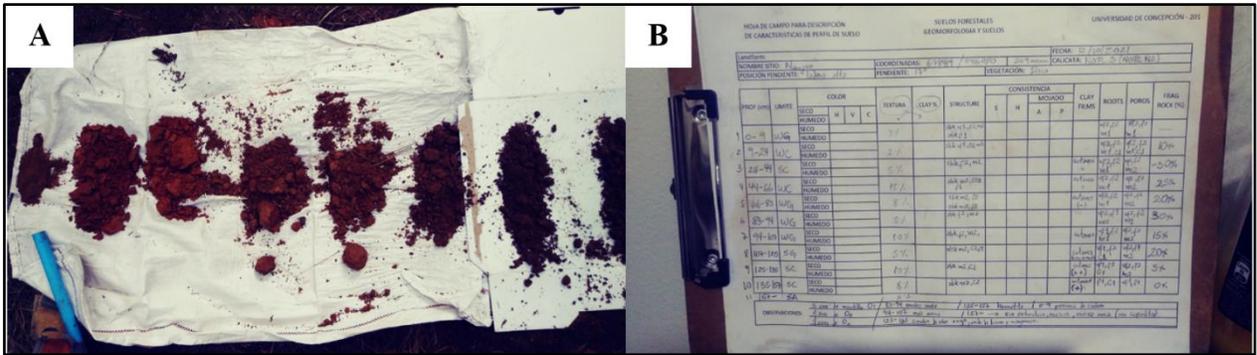


Figura 4.1: en (A) toma de muestras de suelo en calicata PL3. En (B) registro de descripción del perfil de suelo PL3.

El equipo de investigación realizó la selección de ocho parcelas de estudio (Figura 3.2) dentro del Parque Nacional Nonguén, cuatro en uso de suelo de bosque nativo secundario (BN) y 4 en uso de suelo de plantaciones de *Pinus sp.* (PL). Para la selección de los sitios se tuvo presente las condiciones en terreno como la topografía, considerando aspectos como la pendiente y dirección, y en específico para los sitios ubicados en las plantaciones forestales, se buscó ubicaciones tentativas de manera preliminar a través de imágenes satelitales, debido a que, como se puede apreciar en la Figura 3.2 las plantaciones de *Pinus sp.* son relativamente escasas en comparación a las de bosque nativo. Para este proyecto de tesis en específico solo se utilizaron seis (Figura 4.2) de los ocho sitios seleccionados, tres sitios en bosque nativo (BN1, BN2, BN4) y tres sitios en plantación (PL1, PL2, PL4). En los seis sitios escogidos para este estudio (Figura 4.2), se realizaron calicatas (Figura 4.3) de 1,5 metros de largo y 1 metro de ancho aproximadamente, con una profundidad variable entre 1,5 y 1,8 metros. En estas calicatas se realizó una descripción a detalle del perfil de suelo (Figura 4.1B), todo esto siguiendo el protocolo presentado en el libro “*Field Book for Describing and Sampling Soils*”. Además, se tomó una muestra de suelo por horizonte (Figura 4.1A y Figura 5.1 y 5.2) en cada uno de los seis sitios, tomando un total de 50 muestras distribuidas de la siguiente manera: 7 muestras en BN1, 7 muestras en BN2, 9 muestras en BN4, 8 muestras en PL1, 10 muestras en PL2, 9 muestras en PL4.



Figura 4.2: sitios de estudio de este trabajo, la parte superior corresponde a parcelas en bosque nativo y la parte inferior corresponde a parcelas de plantación de *Pinus sp.* A.- Corresponde a sitio BN1. B.- Corresponde a sitio BN2. C.- Corresponde a BN4. D.- Corresponde a sitio PL1. E.- Corresponde a sitio PL3. F. Corresponde a sitio PL4.

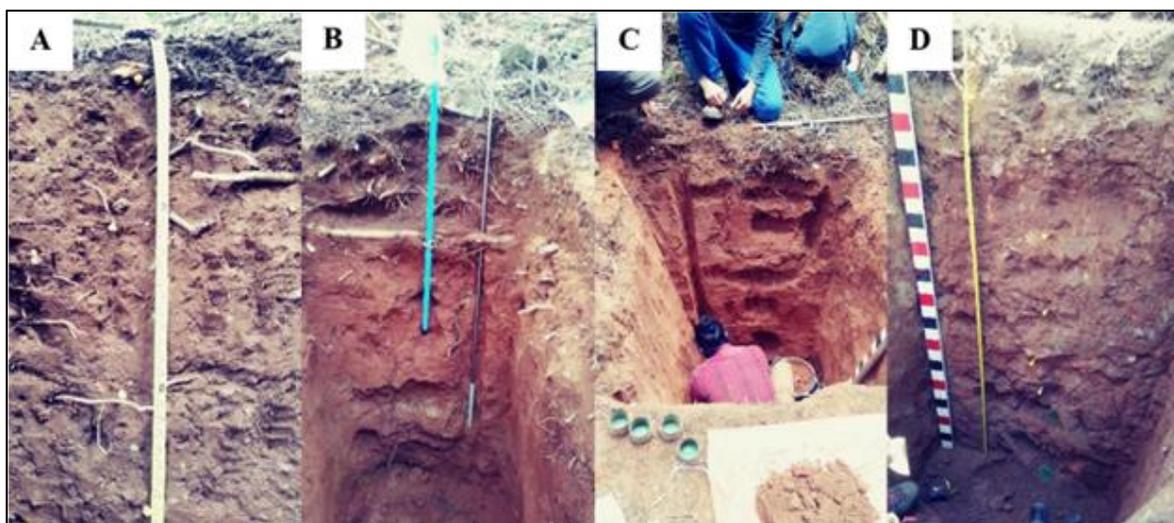


Figura 4.3: calicatas realizadas en los sitios. A.- Calicata en BN1. B.- Calicata en BN3. C.- Calicata en PL1. D.- Calicata en PL4.

4.1.2 Preparación de las muestras

En la parte final de esta etapa, el equipo realizó el trabajo de preparación de las muestras. Estas se almacenaron a 2°C en las dependencias del Laboratorio de Suelos de la Facultad de Ciencias Forestales y luego se realizaron los procesos de secado y tamizado en el Laboratorio de Sedimentología del Departamento de Ciencias de la Tierra. Para el secado, cada muestra se dispone en una bandeja metálica y son colocadas en un horno y secadas a 60°C por 3 días. Luego del secado, pasan por un tamiz con malla de 2 mm, 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.

Para el análisis químico, las muestras fueron enviadas al Laboratorio Actlabs (*Activation Laboratories ltd.*) en Canadá, donde mediante la técnica de ICP-MS por fusión de borato de Li se midieron las concentraciones de los elementos mayores, traza y de tierras raras.

Por otro lado, se enviaron las muestras a análisis de C_{total} del suelo al Laboratory of Routine Measurements & Analyses (RoMA), perteneciente al Max Planck Institute for Biogeochemistry, Jena, Alemania. El carbono total de las muestras se determinó mediante un analizador elemental después de la combustión a 1150 °C (Elementaranalysator vario Max CN, Elementar Analysensysteme GmbH, Hanau, Alemania). Por otra parte, la concentración de carbono inorgánico se midió mediante análisis elemental después de eliminar el carbono orgánico durante 16 horas a 450 °C en un horno de mufla mediante oxidación

4.2 Segunda etapa

La segunda etapa, se centra en la recopilación de material bibliográfico, en trabajo de laboratorio para lograr obtener la textura y las propiedades fisicoquímicas de las diferentes muestras de suelo y en salidas a terrenos para reconocimiento del área de estudio y de los sitios.

4.2.1 Recopilación bibliográfica

La recopilación bibliográfica se centra en el análisis de trabajos previos en el área de estudio y en sus cercanías, se recopila bibliografía del comportamiento de elementos de las tierras raras en general, a su comportamiento en los suelos y la relación existente entre las REE, la materia orgánica (MO) y el pH. Además, se recopila estudios relacionados a las consecuencias de los cambios de uso de suelo (LUC) en los contenidos de MO presentes en ellos.

4.2.2 Trabajo de laboratorio

4.2.2.1 Textura de suelo

La textura del suelo se realiza para obtener la proporción de los contenidos de arena, limo y arcilla presentes en los suelos (Anexo 14), para luego clasificarlos según el triángulo de clases texturales (Anexo 15).

La determinación de la textura en laboratorio se basa en el protocolo de Bouyoucos (1962) y el libro “Métodos de análisis físicos del suelo” (Sandoval y otros, 2012). A continuación, se describe brevemente el protocolo:

Para determinar la textura del suelo se prepara una solución de 50 ml de hexametáfosfato de sodio y 950 ml de agua destilada para utilizar como blanco. Luego, se toman 40 gramos de una muestra de suelo previamente tamizada ($< 2\text{mm}$), se mezcla con 50 ml de hexametáfosfato de sodio y 100 ml de agua destilada en una batidora durante 2 minutos, esta solución se vierte en una probeta y se rellena con agua destilada hasta completar los 1000 ml. Después se agita la solución durante 1 minuto y luego se mide la temperatura y la densidad utilizando un hidrómetro en dos momentos específicos después de mezclar la solución; a los 40 segundos y a las 7 horas. Es crucial aplicar correcciones para la temperatura y la densidad para garantizar una precisión óptima en los resultados. Las correcciones se realizan restando la lectura del blanco para finalmente determinar los porcentajes de arcilla, limo y arena de la muestra de suelo.

4.3 Tercera etapa

La tercera etapa contempla un análisis estadístico cuantitativo y cualitativo de los datos obtenidos en terreno y de los estudios geoquímicos. Se realizará un balance de masas de los suelos y se establecerá si existen relaciones entre los contenidos y la distribución de la materia orgánica y las tierras raras. Para finalmente validar o refutar la hipótesis planteada inicialmente. En esta etapa todos los cálculos y gráficos necesarios fueron realizados mediante el software EXCEL.

4.3.1 Análisis de datos

Primero, para el análisis de datos de las tierras raras y de los contenidos de carbono se realiza un control de calidad de los datos, en este se revisan los valores de los datos, verificando si se encuentran por sobre el límite de detección y filtrando de ser necesario los elementos que presenten más de un 50% de sus muestras bajo el límite.

4.3.1.1 Control de calidad

En esta etapa se calcula el error analítico asociado utilizando los duplicados de terreno y los estándares internacionales para cada caso.

Para poder utilizar de manera correcta y segura los resultados analíticos de las muestras de suelos, estas son sometidas a un control de calidad, donde se utilizan los duplicados de laboratorio y las muestras estándar para determinar la precisión y exactitud de las mediciones. En este estudio en específico no se cuenta con duplicados de terreno, por lo que se considera solo el error analítico para el control de calidad. Para esto utilizamos la fórmula (5.1) utilizada por Stanley y Lawie, (2007):

$$cv\% = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(2 \frac{(x_{1i} - x_{2i})^2}{(x_{1i} + x_{2i})^2} \right)} \times 100 \quad (5.1)$$

Donde x_{1i} y x_{2i} corresponden a dos muestras duplicadas o dos mediciones de una misma muestra estándar y n corresponde al número de duplicados.

4.3.1.2 Tierras raras (REE)

Para el caso de las tierras raras, primero se realizan un análisis estadístico de los datos que se muestra mediante diferentes tipos de gráficos, como pueden ser, gráficos boxplot para analizar las distribuciones de los contenidos de REE en los diferentes sitios, también se realizan gráficos donde se relaciona la concentración de los elementos con la profundidad, para verificar la distribución y comportamientos de los diferentes elementos y grupos de tierras raras (LREE, MREE y HREE) en los horizontes de suelo presentes en cada perfil. Además, se realizan gráficos multielementos con las concentraciones de REE en roca y suelos normalizadas al condrito, esto permite la comparación de sus patrones de distribución. Además, se calcula la suma total de las tierras raras (Σ REE) como un indicador que representa la concentración global de todas las REE como un grupo en un material específico.

Para evaluar la movilidad y la distribución de las tierras raras (j) entre la roca (p) y el suelo (w), se aplica el coeficiente de transferencia de masa τ_{ij} (Brimhall y Dietrich, 1987). Este coeficiente utiliza la concentración (C) de un elemento considerado inmóvil (i), como por ejemplo Ti o Zr, para comparar las ganancias o pérdidas de cada elemento del grupo de las REE en los perfiles de suelo y entre los distintos suelos analizados (Castillo, 2019).

$$\tau_{ij} = \frac{C_{j.w}}{C_{j.p}} \cdot \frac{C_{i.p}}{C_{i.w}} - 1 \quad (4.1)$$

En este contexto, se ha examinado la distribución de los elementos Si, Zr y Ti en diversas muestras de rocas y suelos, y se ha observado que el Ti es el elemento que presenta la menor variabilidad en los seis sitios analizados. Por esta razón, se ha seleccionado al Ti como el elemento inmóvil para utilizar en la ecuación (4.1).

Dado que en este estudio no se obtuvieron muestras de roca en los sitios, tanto para los diagramas multielementos en roca y como para el cálculo de transferencia de masa, los datos de REE en la roca parental utilizados, son obtenidos de una recopilación bibliográfica de los intrusivos paleozoicos del Batolito Costero presentes en las cercanías de Concepción, donde los datos son extraídos de los trabajos realizados por Creixell (2001) y Lucassen y otros, (2004). En total, se recopilan 17 datos de muestras de roca, para obtener un promedio para cada elemento de las REE y así trabajar estos valores promediados como línea de base de los contenidos de tierras raras presentes en las rocas del área de estudio.

Además, se realiza el cálculo del promedio ponderado de REE para cada sitio de estudio. Para esto, se promedian los contenidos de REE de cada horizonte en función de su espesor y el espesor total de la calicata.

Lo anteriormente descrito, se realizará en los seis sitios de trabajo, con el objetivo de comparar las discrepancias y similitudes que presentan los contenidos de REE en el uso de suelo de bosque nativo versus el uso de suelo de plantaciones forestales, para así validar o refutar la hipótesis de este estudio. Además, se realizará un análisis comparativo del comportamiento de las REE en los diferentes horizontes de suelo.

4.3.1.3 Carbono (C)

Para el contenido de carbono presente en los suelos también se realiza un análisis estadístico de los datos. Primero, como en los datos recibidos desde laboratorio solo se encuentran los contenidos de C total (C_t) y de C inorgánico (C_i) en los suelos, es necesario calcular el contenido de C orgánico (C_o) en cada muestra, para esto se utiliza la fórmula (4.2)

$$C_o(\%) = C_t(\%) - C_i(\%) \quad (4.2)$$

En este estudio, es fundamental disponer de los contenidos de materia orgánica (MO) en los suelos, ya que se busca establecer relaciones entre estos contenidos, las REE, y propiedades del suelo, como la textura. Para obtener el porcentaje de materia orgánica se debe utilizar la fórmula (4.3) extraída de Vela y otros, (2012).

$$MO\% = C_o \quad MO(\%) = C_o(\%) \cdot 1,72 \quad (4.3)$$

Por último, se crea una matriz de correlación de Pearson entre los parámetros que se pretende relacionar (MO, REE y textura) y se generan diversos gráficos que representan estas relaciones, con el fin de facilitar la comprensión de los vínculos entre los parámetros.

5 RESULTADOS

5.1 Control de calidad datos

Para el estudio se establece un límite de error (CV%) del 10% para que el elemento pueda ser utilizado. Se utilizan 4 duplicados de laboratorio (BN1-1, BN2-5, PL1-1, PL4-2) y 2 estándares (ZW-C Meas y BIR-1a Meas) para el cálculo. Luego de calcular los errores (Tabla 5.1), ningún elemento sobrepasa el error del 10% siendo incluso el error más alto de 6,04% para el Lu comparado con el estándar “ZW-C Meas”. Por lo anterior, se prueba la confianza de los datos y se puede proceder con las etapas siguientes.

Tabla 5.1: errores analíticos calculados mediante la fórmula (5.1) para cada elemento del grupo de las tierras raras.

Elemento	Error CV%			Elemento	Error CV%		
	Duplicado Lab	Estándar ZW-C Meas	Estándar BIR-1a Meas		Duplicados Lab	Estándar ZW-C Meas	Estándar BIR-1a Meas
La	0,19%	1,72%	-	Tb	0,11%	-	-
Ce	0,17%	0,76%	-	Dy	0,25%	-	-
Pr	0,21%	1,18%	-	Ho	0,37%	2,45%	-
Nd	0,15%	1,90%	-	Er	0,34%	-	-
Sm	0,08%	1,25%	-	Tm	0,36%	4,86%	-
Eu	0,22%	-	3,81%	Yb	0,44%	6,02%	3,86%
Gd	0,22%	1,66%	5,02%	Lu	0,44%	6,04%	3,49%

5.2 Recopilación datos de roca

Con la información recopilada se calculó un promedio para cada elemento de las REE, dando lugar a la creación de una "muestra promedio" (Tabla 5.2, resaltada en rojo). Esta muestra promedio se empleará como referencia para comparar los datos obtenidos de las muestras de suelo recopiladas en el trabajo de campo.

Tabla 5.2: recopilación de datos de REE para rocas graníticas del Batolito Costero del Sur. Concentraciones en ppm.

Elemento Muestra	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
(1) Creixell (2001); (2) Lucassen y otros, (2004)	00-08 ²	27,48	38,46	5,64	20,68	4,06	0,99	3,75	0,55	3,41	0,72	2,21	0,35	2,42	0,40
	00-14 ²	21,66	42,70	5,27	20,98	4,60	1,73	4,30	0,64	3,78	0,73	2,01	0,27	1,73	0,25
	00-21 ²	22,11	45,77	6,01	24,50	5,85	1,21	5,49	0,87	5,30	1,02	2,97	0,40	2,66	0,37
	00-32 ²	42,37	107,81	9,84	33,66	5,40	1,15	3,54	0,48	2,57	0,48	1,35	0,19	1,26	0,19
	00-36 ²	15,06	32,27	4,19	16,19	3,46	1,00	3,32	0,49	3,10	0,65	1,88	0,27	1,92	0,29
	00-51 ²	16,16	35,50	4,53	18,80	4,40	1,23	4,24	0,66	4,08	0,83	2,38	0,35	2,23	0,34
	00-54 ²	30,44	67,39	8,33	32,15	7,93	1,17	6,52	0,86	4,10	0,63	1,60	0,21	1,26	0,18
	00-56 ¹⁻²	26,55	58,54	7,22	27,79	6,87	1,25	5,77	0,75	3,43	0,55	1,42	0,18	1,14	0,17
	00-58 ¹⁻²	52,27	112,31	13,54	52,53	10,76	1,44	8,57	1,18	6,30	1,12	2,92	0,38	2,32	0,33
	00-75 ¹⁻²	18,04	39,76	4,91	18,53	4,53	0,70	3,95	0,55	2,87	0,47	1,30	0,18	1,10	0,15
	00-77 ²	35,04	82,70	9,35	36,58	8,23	1,28	7,66	1,23	7,78	1,52	4,48	0,64	4,09	0,58
	00-82 ¹⁻²	22,79	50,53	6,67	29,71	7,92	1,53	8,28	1,30	7,98	1,57	4,54	0,61	3,80	0,53
	00-139 ²	19,59	43,30	5,28	20,78	4,48	1,02	4,26	0,64	3,99	0,81	2,33	0,34	2,16	0,32
	00-142 ²	23,73	57,04	7,33	29,31	6,41	1,21	5,50	0,83	5,15	1,02	3,06	0,43	2,84	0,41
	00-144 ²	17,72	38,65	4,64	17,68	4,04	0,76	3,62	0,57	3,68	0,70	2,10	0,31	2,04	0,30
	00-148 ²	14,67	33,76	4,29	17,61	3,98	1,05	3,72	0,59	3,74	0,74	2,22	0,31	2,06	0,29
00-161 ²	44,82	88,90	9,93	36,26	6,83	1,28	5,52	0,81	4,76	0,93	2,71	0,37	2,51	0,37	
Promedio (\bar{X})	26,50	57,38	6,88	26,69	5,87	1,18	5,18	0,76	4,47	0,85	2,44	0,34	2,21	0,32	

5.3 Descripción física de los suelos

Para la descripción en terreno de cada perfil de suelo se determinaron sus principales características físicas, como el espesor de cada horizonte, tipos de contactos entre estos, las estructuras que presentan, cantidad de poros, raíces y el porcentaje de fragmentos rocosos.

Los sitios bajo bosque nativo (Figura 5.1) presentan contactos relativamente definidos entre los horizontes, siendo graduales o claros. En los primeros 80 cm del perfil los límites se conservan lisos y a hacia mayores profundidades estos contactos se vuelven más sinuosos. En los tres sitios se reconocen horizontes A y B, y específicamente BN1 y BN3 presentan un horizonte superficial de acumulación de materia orgánica (Oi).

Los contenidos de raíces varían a lo largo del perfil, pero con una tendencia a disminuir su contenido en profundidad e incluso con ausencia de estas en algún horizonte profundo (horizonte B7 en sitio BN4). Además, el grosor de las raíces varía, siendo las raíces finas ($1 < 2\text{mm}$) las que se presentan en todos los horizontes, estas son más abundantes que las raíces

gruesas (5 - < 10mm) y son más abundantes en los horizontes superficiales, por otro lado, las raíces gruesas se concentran en los horizontes superiores, a excepción de BN1 que presenta en sus horizontes profundos, pero en menor cantidad.

Con respecto a los poros, estos van de muy finos a medios, sin embargo, los horizontes B1 y B4 de BN1 y los horizontes A1, A2 y B1 de BN4 presentan poros gruesos entre 5-10 mm, pero con una recurrencia menor a 1 por 10 cm² por horizonte. Además, se reconocen poros intersticiales en el horizonte Oi de BN1.

En los tres perfiles se reconocen fragmentos rocosos que varían en tamaño (1 a 15 cm), forma (angulosos a subredondeados) y proporción (1% a 40% por horizonte). En general, el tamaño y la cantidad de fragmentos aumenta hacia los horizontes profundos. Particularmente en el sitio BN1 se identifican dos horizontes clásticos o conglomerádicos (B2 y B4; Figura 5.1).

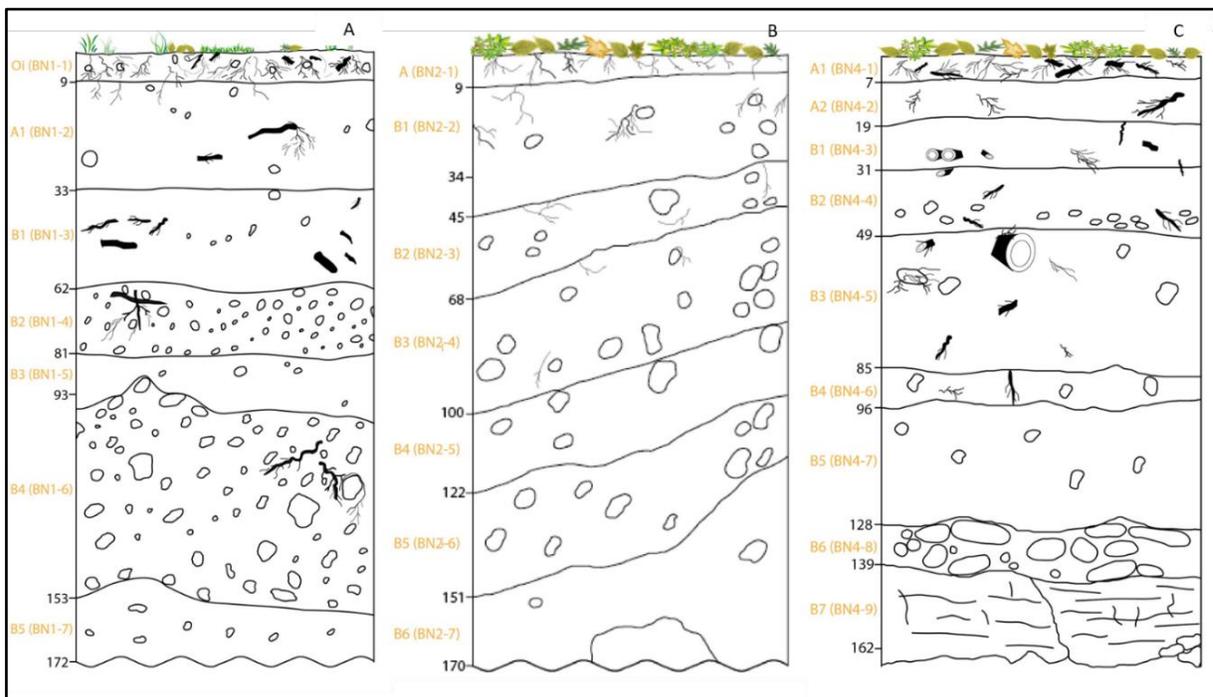


Figura 5.1: perfiles de los horizontes y su respectiva muestra para los sitios BN. En (A) BN1. En (B) BN2. En (C) BN4. Extraído y modificado de Navarrete, 2023.

Los sitios bajo plantaciones (Figura 5.2) presentan límites parcialmente definidos entre horizontes y más claros que los presentes en los sitios bajo bosque nativo, al igual que estos sitios, los contactos son algunos claros y otros graduales y son lisos en los horizontes superficiales y pasan a sinuosos en profundidad. El sitio PL3 posee un comportamiento

diferente que presenta horizontes sinuosos hasta el horizonte B6 y son más lisos en el primer horizonte y desde el horizonte B7 al B9 y los contactos entre horizontes son mayormente graduales. Además, en los tres sitios se reconocen horizontes A y B principalmente, específicamente PL4 es el único sitio que presenta un horizonte C, el que corresponde a un horizonte de roca meteorizada, por otro lado, PL3 es el único sitio de los tres que presenta un horizonte O correspondiente a materia orgánica.

Las raíces a lo largo de los perfiles van de finas a muy finas y en algunos casos se presentan raíces gruesas. Se identifican raíces en todos los horizontes siendo más abundantes en los niveles superiores hasta los 60 a 70 cm aproximadamente.

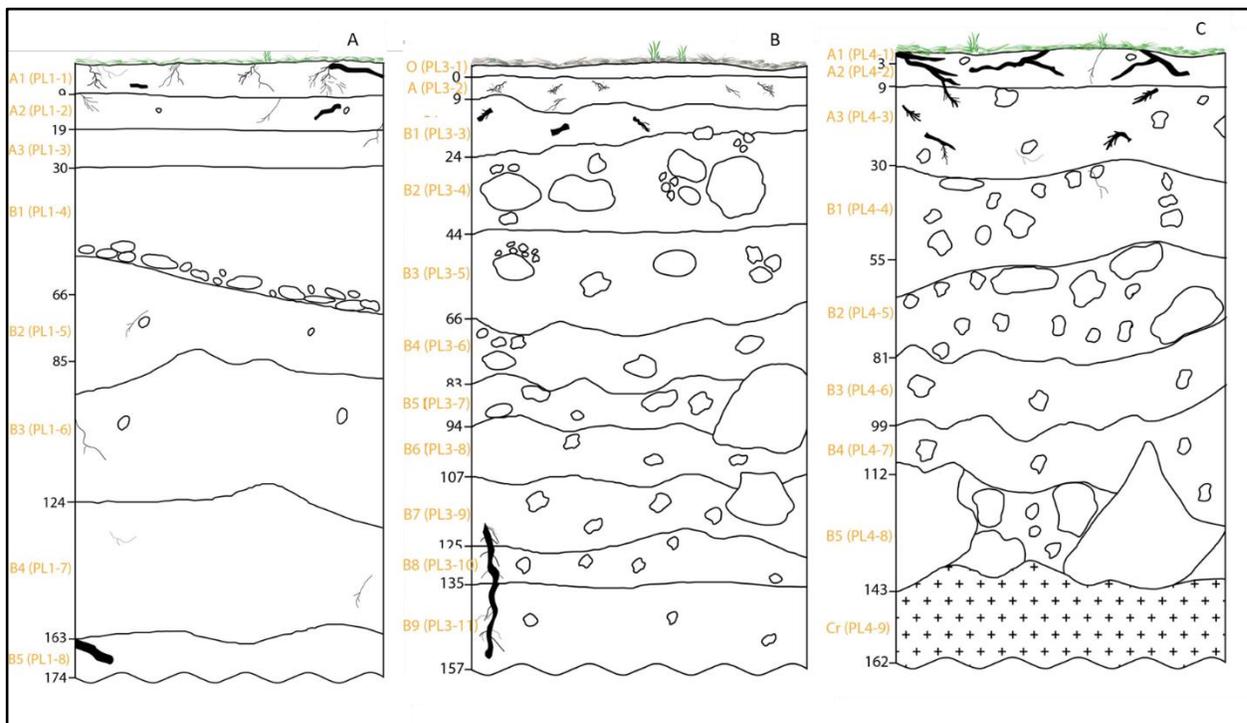


Figura 5.2: perfiles de los horizontes y su respectiva muestra para los sitios PL. En (A) PL1. En (B) PL3. En (C) PL4. Extraído y modificado de Navarrete, 2023.

Los poros varían en tamaño yendo desde muy finos (< 1 mm) a gruesos (5 a < 10 mm), en NOPL4 también se identifican poros intersticiales (horizontes A1 y Cr). Con respecto a los fragmentos rocosos, estos van desde el 0% al 40%. Donde destaca PL1 dada la baja presencia de estos fragmentos incluso con la ausencia de estos en algunos horizontes, otra característica que destaca en este sitio es en su horizonte B1, el cual posiblemente podría corresponder a un paleocanal. En los otros sitios (PL3 y PL4) hay gran abundancia de clastos en algunos

horizontes, estos varían en tamaño desde algunos centímetros hasta 10 o más centímetros, también en su forma varían desde subredondeados a angulosos. Algunos horizontes se identifican como niveles conglomerádicos matriz soportados que podrían corresponder a depósitos coluviales.

5.4 Geoquímica de los elementos del grupo de las tierras raras

El análisis de los patrones de tierras raras (REE) proporciona información valiosa para la identificación de rocas o suelos con un origen común o que han experimentado procesos similares de diferenciación, alteración o formación, considerando esto se busca caracterizar a los suelos de este estudio respecto al uso de suelo en el cual se formaron. Para esto se despliegan los patrones de REE de las muestras de los seis sitios mediante diagramas multielementos (Figuras 5.3 y 5.4) normalizados al condrito (Rollinson, 1993), y se comparan los patrones de promedios ponderados por sitio con la roca parental (Figuras 5.3D y 5.4D). Además, se analiza el comportamiento de los diferentes grupos de tierras raras (LREE, MREE, HREE) en el perfil de suelo, comparando sus contenidos a diferentes profundidades (Figuras 5.5, y 5.6).

5.4.1 Patrones multielemento

5.4.1.1 Sitios en bosque nativo

En los tres sitios ubicados en uso de suelo de bosque nativo, se recolectaron un total de 23 muestras de suelo. Los contenidos de tierras raras (REE) de estas muestras se detallan en la Tabla 5.3, con colores diferenciando el origen de cada sitio. También, se calculó para cada sitio un promedio ponderado de cada elemento. Esta ponderación se llevó a cabo para facilitar la comparación entre los sitios, porque los sitios no cuentan con la misma cantidad de muestras. Además, dado que cada muestra representa un horizonte de suelo con espesores variados, el promedio ponderado en función del espesor resulta más representativo de los contenidos en el perfil de suelo de cada sitio. Los promedios ponderados calculados, se presentan remarcados en gris en la Tabla 5.3.

A partir de las Figuras 5.3A, 5.3B y 5.3C es posible observar que las muestras presentan patrones de REE en los sitios BN1, BN2 y BN4 que son relativamente similares. Al examinar

las concentraciones en las muestras, no se observan valores atípicos evidentes. Las concentraciones de tierras raras parecen seguir una distribución relativamente uniforme en las muestras con leves variaciones en las concentraciones, con Σ REE 233,15 ppm para BN1, 256,64 ppm para BN2 y 204,88 ppm para BN4. Además, la roca parental (Figura 5.3D) presenta el patrón típico para las rocas de la corteza continental superior (Rudnick & Fountain, 1995 en Castillo, 2019) con un enriquecimiento de LREE respecto de las HREE y con anomalías negativas de Eu, esto al normalizar las muestras al condrito.

Tabla 5.3: contenidos de REE (ppm) para las muestras de los tres sitios (BN1, BN2, BN4) ubicados en bosque nativo y promedios ponderados para cada sitio.

	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
BN1-1	48,60	92,70	11,80	44,80	9,30	1,52	7,40	1,10	7,00	1,40	3,80	0,54	3,50	0,54
BN1-2	55,00	106,00	13,70	52,00	9,80	1,83	7,90	1,30	7,60	1,50	4,30	0,67	4,50	0,69
BN1-3	53,10	101,00	12,90	48,30	9,40	1,73	7,80	1,20	7,30	1,40	4,10	0,60	4,00	0,62
BN1-4	50,30	97,90	12,50	47,60	9,20	1,84	7,80	1,30	7,90	1,50	4,20	0,65	4,30	0,67
BN1-5	40,10	88,30	10,10	38,70	7,70	1,66	6,40	1,00	6,20	1,20	3,40	0,53	3,60	0,54
BN1-6	39,00	99,50	9,94	38,20	7,30	1,51	6,20	0,90	5,80	1,10	3,20	0,49	3,30	0,51
BN1-7	36,30	106,00	8,80	33,20	6,40	1,26	5,10	0,80	5,00	1,00	2,90	0,43	2,90	0,49
BN2-1	42,80	88,10	10,10	37,70	7,60	1,21	6,40	0,90	5,50	1,10	3,20	0,44	2,80	0,45
BN2-2	50,60	107,00	12,20	46,30	8,90	1,63	7,30	1,10	6,50	1,20	3,60	0,56	3,70	0,57
BN2-3	48,50	102,00	11,90	45,40	9,10	1,67	7,10	1,10	6,30	1,20	3,40	0,50	3,50	0,57
BN2-4	52,70	104,00	12,60	48,30	9,20	1,59	7,20	1,00	5,90	1,20	3,30	0,50	3,50	0,57
BN2-5	56,60	103,00	13,30	49,00	9,10	1,47	7,50	1,10	6,80	1,40	4,20	0,64	4,30	0,71
BN2-6	59,90	107,00	13,70	50,00	9,30	1,28	7,10	1,00	6,10	1,20	3,50	0,54	3,50	0,59
BN2-7	70,80	114,00	16,10	57,30	10,50	1,48	8,00	1,20	6,80	1,40	4,00	0,61	4,10	0,67
BN4-1	38,60	83,00	9,89	38,40	8,20	1,55	7,50	1,20	7,40	1,50	4,70	0,72	4,70	0,74
BN4-2	40,20	86,70	10,20	40,10	8,30	1,53	7,30	1,10	7,00	1,40	4,20	0,63	4,40	0,69
BN4-3	36,80	85,00	8,59	33,20	6,80	1,07	6,30	1,10	6,70	1,40	4,30	0,64	4,40	0,70
BN4-4	36,00	82,90	8,53	31,70	6,30	0,89	5,30	0,90	5,10	1,00	3,00	0,45	3,00	0,47
BN4-5	37,50	84,10	8,94	33,60	6,60	0,87	5,60	0,90	5,50	1,10	3,20	0,50	3,30	0,52
BN4-6	41,10	88,30	9,22	34,70	6,80	0,91	6,20	1,00	6,30	1,30	4,10	0,64	4,30	0,68
BN4-7	48,30	99,00	11,00	40,60	7,40	1,21	6,70	1,10	6,40	1,30	3,80	0,59	4,00	0,65
BN4-8	39,90	79,90	8,00	27,60	5,00	0,68	4,20	0,70	4,20	0,80	2,40	0,38	2,60	0,41
BN4-9	36,90	109,00	8,65	31,50	6,20	0,80	5,10	0,90	5,40	1,10	3,40	0,53	3,60	0,59
BN1-\bar{X} Ponderado	45,15	100,03	11,24	42,72	8,25	1,61	6,85	1,06	6,54	1,26	3,63	0,55	3,69	0,57
BN2- \bar{X} Ponderado	55,17	104,98	13,00	48,46	9,21	1,50	7,28	1,06	6,30	1,25	3,60	0,55	3,68	0,60
BN4- \bar{X} Ponderado	39,98	90,66	9,32	34,80	6,78	1,01	5,92	0,98	5,87	1,18	3,55	0,55	3,69	0,59

Los resultados indican que todos los suelos que se presentan en bosque nativo presentan en promedio mayores contenidos de REE respecto al promedio de roca parental (Σ REE= 145,88), tal y como se aprecia en la Figura 5.3D. Pese a tener una concentración menor, la

roca parental presenta un patrón similar al de los suelos. Específicamente los suelos desarrollados en el sitio BN4 ($\Sigma\text{REE} = 185\text{-}232$ ppm; $\bar{X}_{\Sigma\text{REE}} = 204,88$ ppm) presentan concentraciones menores en relación a los sitios BN1 ($\Sigma\text{REE} = 209\text{-}266$ ppm; $\bar{X}_{\Sigma\text{REE}} = 233,15$ ppm) y BN2 ($\Sigma\text{REE} = 208\text{-}296$ ppm; $\bar{X}_{\Sigma\text{REE}} = 256,64$ ppm).

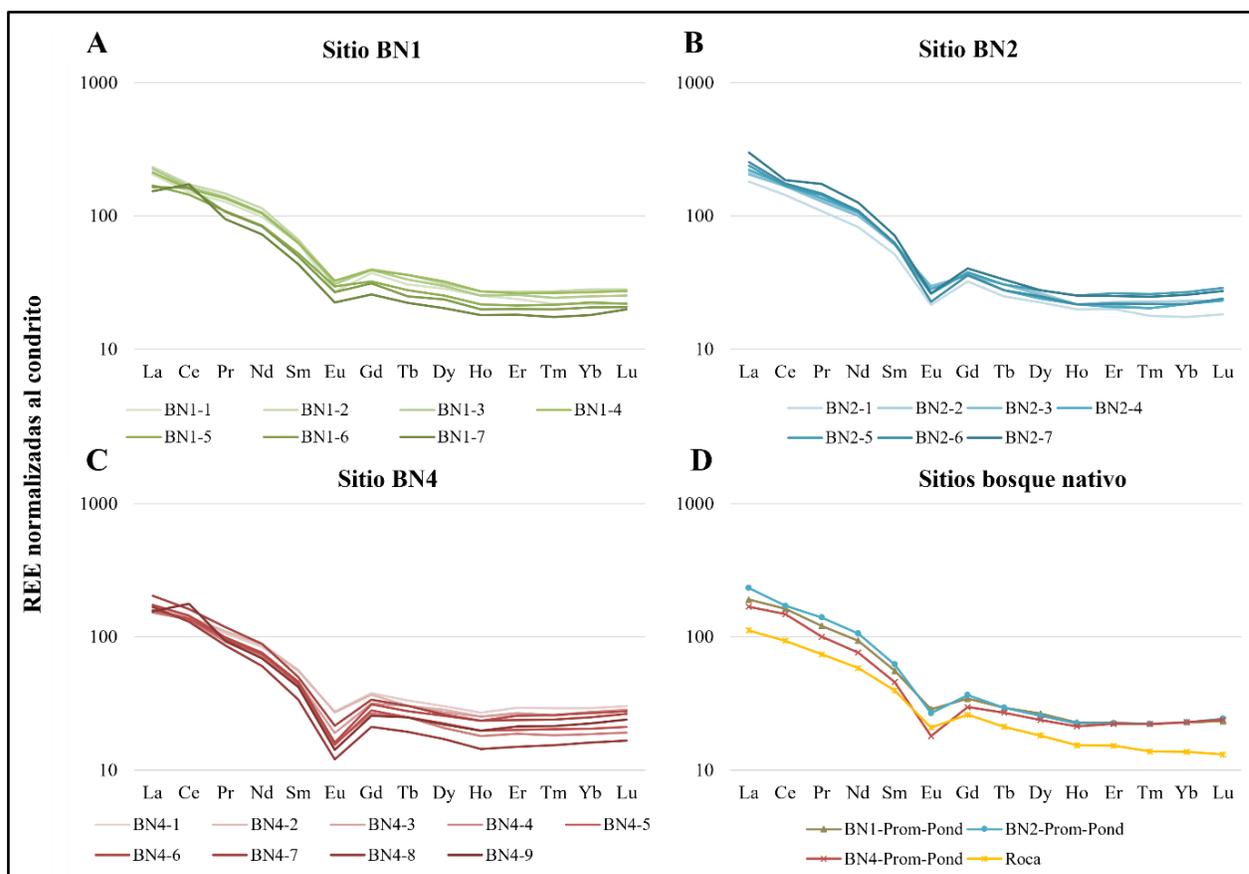


Figura 5.3: (A) Patrones de tierras raras (REE) para las muestras del sitio BN1. (B) Patrones de REE para las muestras del sitio BN2. (C) Patrones de REE para las muestras del sitio BN4. (D) Patrones de REE para contenidos ponderados en cada uno de los sitios y para la “muestra promedio” de roca parental. Todos los contenidos están normalizados al Condrito.

5.4.1.2 Sitios en plantaciones

En los tres sitios localizados en zonas de uso de suelo con predominancia de *Pinus sp.*, se llevaron a cabo colectas de un total de 27 muestras de suelo. En la tabla 5.4, se presentan los contenidos de tierras raras (REE) de estas muestras, destacando con diferentes colores su procedencia desde los respectivos sitios. Al igual que en el caso de los sitios de bosque nativo, se realizó el cálculo de un promedio ponderado para cada elemento en cada sitio, y estos valores se encuentran en la tabla 5.4, marcados en gris.

De acuerdo a las Figuras 5.4A, 5.4B y 5.4C, se destaca una considerable variación en las concentraciones de REE, con Σ REE alcanzando los 158,06 ppm en PL1, 222,84 ppm en PL3 y 296,97 ppm en PL4, donde un sitio puede contener casi el doble de REE que otro.

Tabla 5.4: contenidos de REE (ppm) para las muestras de los tres sitios (PL1, PL3, PL4) ubicados en plantaciones de *Pinus sp.* y promedios ponderados para cada sitio.

Elemento Muestra	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
PL1-1	33,90	79,20	7,93	30,10	6,10	0,72	5,30	0,90	5,80	1,20	3,70	0,56	3,70	0,59
PL1-2	31,40	76,80	7,20	27,30	5,30	0,78	4,90	0,80	5,20	1,10	3,40	0,52	3,60	0,57
PL1-3	35,00	82,20	6,75	25,40	5,00	0,77	4,60	0,80	4,70	1,00	2,90	0,46	3,10	0,56
PL1-4	27,30	78,70	6,78	25,80	4,90	0,80	4,40	0,80	4,80	1,00	2,90	0,47	3,20	0,52
PL1-5	17,50	62,90	4,14	16,10	3,20	0,60	3,10	0,50	3,20	0,60	1,90	0,31	2,20	0,35
PL1-6	18,10	80,90	4,34	17,20	3,60	0,66	3,10	0,50	3,20	0,70	2,00	0,31	2,20	0,35
PL1-7	29,10	93,10	6,56	24,50	4,70	0,83	3,90	0,60	3,70	0,80	2,30	0,35	2,30	0,38
PL1-8	32,30	101,00	7,72	29,60	5,60	1,12	4,60	0,70	4,10	0,80	2,60	0,39	2,50	0,47
PL3-1	47,10	84,60	10,90	39,70	8,10	1,25	6,20	1,00	6,10	1,20	3,40	0,50	3,40	0,52
PL3-2	51,10	92,50	11,90	43,80	8,20	1,51	7,20	1,10	6,50	1,30	3,80	0,57	3,70	0,57
PL3-3	47,50	97,40	11,00	40,80	7,70	1,29	6,30	1,10	7,10	1,40	4,20	0,64	4,20	0,69
PL3-4	56,00	136,00	12,50	44,40	8,50	1,39	6,50	1,00	6,30	1,20	3,70	0,54	3,40	0,53
PL3-5	48,50	114,00	11,40	39,40	7,80	1,43	6,10	0,90	5,70	1,10	3,50	0,53	3,60	0,55
PL3-6	36,20	97,40	8,15	28,00	5,60	1,01	4,10	0,70	4,10	0,80	2,40	0,36	2,60	0,41
PL3-7	33,30	89,30	7,17	24,80	4,90	0,96	4,00	0,60	3,80	0,80	2,40	0,36	2,50	0,42
PL3-8	35,40	90,60	7,38	25,60	4,70	0,94	4,00	0,80	4,80	1,00	3,30	0,51	3,60	0,56
PL3-9	37,60	87,40	8,06	29,10	5,00	0,84	4,10	0,70	4,50	1,00	3,00	0,46	3,20	0,53
PL3-10	50,60	103,00	10,90	36,40	6,60	1,12	5,10	0,90	5,20	1,10	3,20	0,50	3,30	0,54
PL4-1	41,50	82,20	9,52	34,80	7,10	0,94	5,60	0,90	5,50	1,10	3,20	0,47	3,10	0,50
PL4-2	52,70	101,00	12,30	45,00	9,30	1,36	7,70	1,30	7,80	1,60	4,70	0,68	4,80	0,77
PL4-3	60,90	109,00	14,60	53,20	11,20	1,69	9,00	1,50	9,00	1,80	5,50	0,82	5,20	0,84
PL4-4	61,70	120,00	14,10	51,30	10,30	1,55	9,00	1,40	8,00	1,50	4,50	0,67	4,30	0,70
PL4-5	68,40	126,00	15,40	53,50	11,10	1,52	9,20	1,40	8,80	1,80	5,10	0,75	5,10	0,83
PL4-6	67,70	120,00	15,00	53,00	10,50	1,42	8,70	1,50	8,70	1,80	5,20	0,79	5,30	0,84
PL4-7	60,50	109,00	13,90	51,30	10,00	1,46	8,90	1,50	9,50	2,00	6,00	0,90	5,80	0,93
PL4-8	66,50	116,00	15,00	54,80	11,50	1,65	9,80	1,60	10,40	2,20	6,60	0,99	6,50	1,03
PL4-9	69,90	135,00	15,40	57,30	11,10	1,67	10,30	1,70	10,90	2,20	6,50	0,98	6,40	0,99
PL1- \bar{X} Ponderado	25,95	82,24	6,04	23,05	4,51	0,77	3,96	0,65	4,04	0,85	2,51	0,39	2,66	0,44
PL3- \bar{X} Ponderado	45,57	102,10	10,20	36,05	6,84	1,20	5,47	0,90	5,54	1,11	3,38	0,51	3,42	0,54
PL4- \bar{X} Ponderado	64,41	118,24	14,63	52,92	10,77	1,56	9,19	1,49	9,20	1,87	5,54	0,83	5,44	0,87

En contraste con los sitios BN, que presentaban mayores contenidos con respecto a la roca parental, los resultados indican que los suelos desarrollados en plantaciones de *Pinus sp.* en los sitios PL3 y PL4 muestran concentraciones altas de REE en comparación con la roca

parental (Figura 5.4D). En cambio, el sitio PL1 posee menores contenidos de LREE y MREE, y muestra un leve aumento de las HREE en relación a la roca (Figura 5.4D). A pesar de las variaciones en las concentraciones, tanto los sitios PL como los BN en general exhiben un patrón de distribución de elementos similar al de la roca parental.

Es fundamental destacar que los suelos desarrollados en PL4 ($\Sigma\text{REE}= 196\text{-}330$ ppm; $\bar{X}_{\Sigma\text{REE}}= 296,97$ ppm) tienen mayores concentraciones de REE con respecto a los sitios PL1 ($\Sigma\text{REE}= 116\text{-}194$ ppm; $\bar{X}_{\Sigma\text{REE}}= 158,06$ ppm), PL3 ($\Sigma\text{REE}= 175\text{-}281$ ppm; $\bar{X}_{\Sigma\text{REE}}= 222,84$ ppm) y a la roca parental ($\Sigma\text{REE}= 145.88$ ppm); y por el contrario el sitio PL1 se encuentra tiene las menores concentraciones de REE respecto a los otros sitios y a la roca parental.

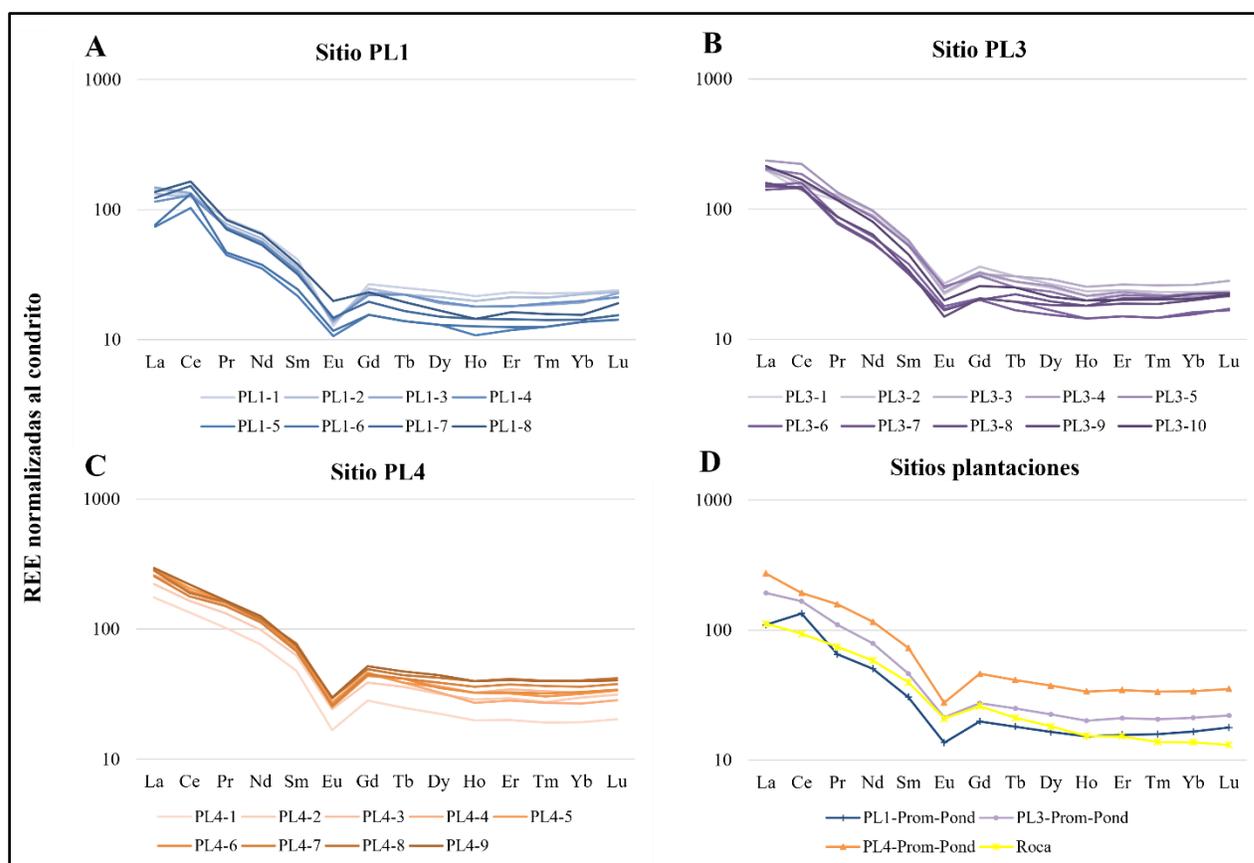


Figura 5.4: (A) Patrones de tierras raras (REE) para las muestras del sitio PL1. (B) Patrones de REE para las muestras del sitio PL2. (C) Patrones de REE para las muestras del sitio PL4. (D) Patrones de REE para contenidos ponderados en cada uno de los sitios.

5.4.2 Distribución del contenido de REE en el perfil de suelo

Al analizar las variaciones de tierras raras (REE) en el perfil de suelo, se utilizan gráficos que representan las concentraciones de estos elementos en relación a la profundidad del perfil.

Estas comparaciones son fundamentales para observar posibles cambios en los contenidos de REE, a lo largo del perfil del suelo y determinar si se concentran en algún horizonte específico. Esto proporciona información valiosa sobre la distribución vertical de las REE en el suelo y su posible influencia proveniente de los procesos biogeoquímicos y pedogenéticos.

5.4.2.1 Sitios en bosque nativo

El análisis de las variaciones en las tierras raras livianas (LREE; La, Ce, Pr y Nd) en profundidad (Anexo 2 y Figura 5.5) revela patrones interesantes, aunque no se reconocen grandes anomalías en los sitios. Sin embargo, el sitio BN4 destaca por presentar una mayor concentración de LREE en el horizonte B5 entre los 96-128 cm de profundidad en asociación con un bajo valor en el horizonte B6 (128-139 cm). Además, cabe destacar que el sitio BN4 presenta valores menores de LREE que los otros sitios en profundidad se identifican dos patrones significativos en profundidad. El primero en el sitio BN2, donde se observa un incremento progresivo de La, Pr y Nd (Anexo 2A, 2B, 2C y Figura 5.5) a medida que se profundiza en el suelo. Por otro lado, el sitio BN1 muestra un comportamiento opuesto, con una disminución de concentraciones de La, Pr y Nd (Anexo 2A, 2B, 2C y Figura 5.5) a partir de 9 cm de profundidad. En lo que respecta al Ce (Anexo 2B), no se identifican patrones claros, y su concentración parece mantenerse relativamente constante a lo largo de la profundidad.

En cuanto a las tierras raras medianas (MREE; Sm, Eu, Gd, Tb, Dy y Ho), no se observan grandes anomalías (Anexo 3, Figura 5.5). Sin embargo, al igual que en las LREE, el sitio BN4 destaca por una mayor concentración en el horizonte B5, seguida de una disminución en el horizonte B6. También en los elementos Sm, Eu y Gd (Anexo 3A, 3B y 3C) el sitio BN4 presenta menos contenidos en el perfil. En términos generales, los perfiles de este grupo (MREE) parecen comportarse de manera similar a medida profundizan, con aumentos o disminuciones de concentración en los horizontes prácticamente constantes en los diferentes elementos a lo largo del perfil de suelo. Al igual que con las LREE, el sitio BN2 presenta un aumento de tierras raras en profundidad y el sitio BN1 una disminución de estas.

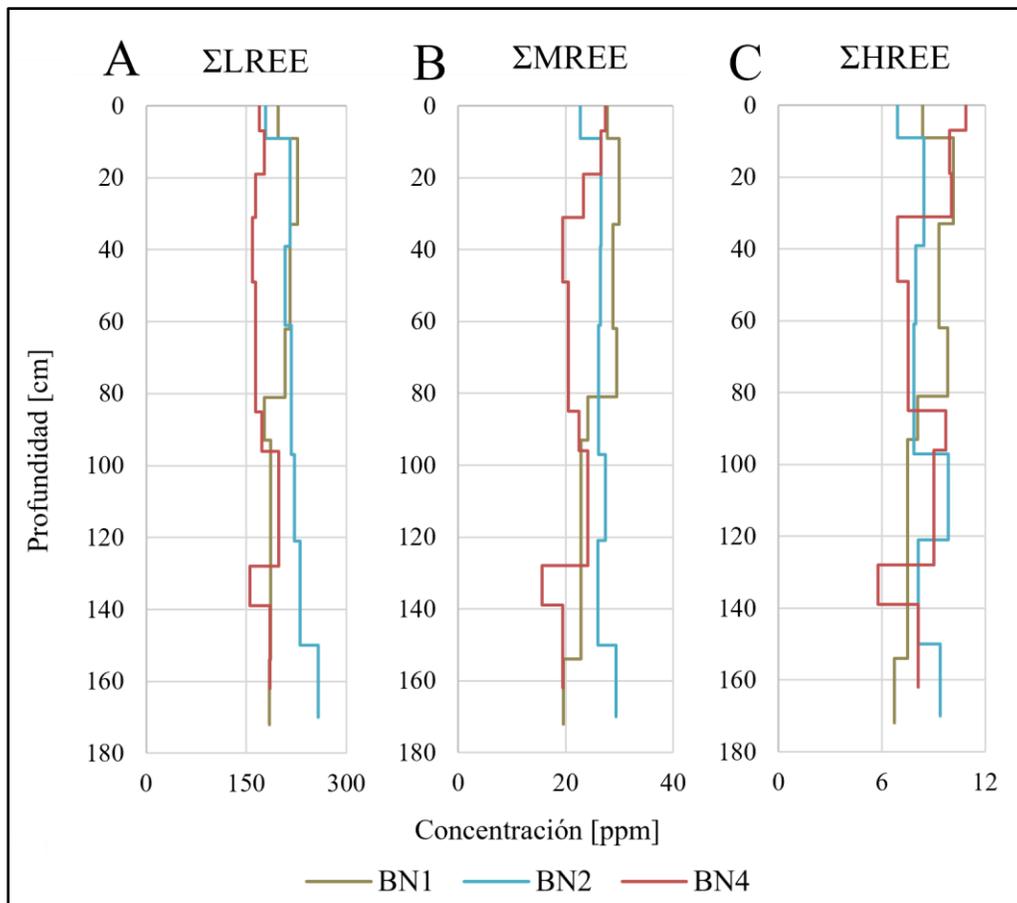


Figura 5.5: contenidos de la sumatoria de tierras raras (Σ LREE, Σ MREE, Σ HREE) en ppm a lo largo del perfil de suelo (profundidad) en cada sitio ubicado bajo uso de suelo de bosque nativo. En (A) concentraciones de Σ LREE. En (B) concentraciones de Σ MREE. En (C) concentraciones de Σ HREE.

En lo que respecta a las tierras raras pesadas (HREE; Er, Tm, Yb y Lu), se observa una distribución en profundidad más variable y menos definida en comparación con las LREE y MREE (Anexo 4 y Figura 5.5). En la mayoría de los perfiles de suelo, no se identifican patrones o anomalías claras. Los contenidos de estos elementos exhiben fluctuaciones significativas a lo largo de la profundidad. Sin embargo, es interesante destacar que los patrones de estos cuatro elementos en cada sitio tienden a comportarse de manera bastante similar en el perfil de suelo, lo que sugiere una cierta uniformidad en la respuesta geoquímica de las HREE en profundidad. Al igual que en los anteriores grupos se repite una baja concentración en el horizonte B6 de BN4, sitio que además posee una alta concentración de HREE en el horizonte superficial (A1) comparado a los otros sitios.

5.4.2.2 Sitios en plantaciones

Con respecto a las LREE (Anexo 5 y Figura 5.6), se identifican patrones notables de aumento y disminución de la concentración en profundidad. El sitio PL4 presenta un aumento en todos los elementos de este grupo, mientras que PL3, muestra un aumento hasta el horizonte B1 (24 cm) y luego disminuyen las concentraciones de LREE a medida que la profundidad aumenta. Por otro lado, PL1 mantiene concentraciones similares en los primeros y últimos centímetros, con una ligera disminución en los horizontes intermedios del contenido que, a una profundidad de aproximadamente 100 cm, comienza a aumentar levemente. En general, los elementos del mismo grupo (LREE) y sitio muestran un comportamiento similar en profundidad (Anexo 5).

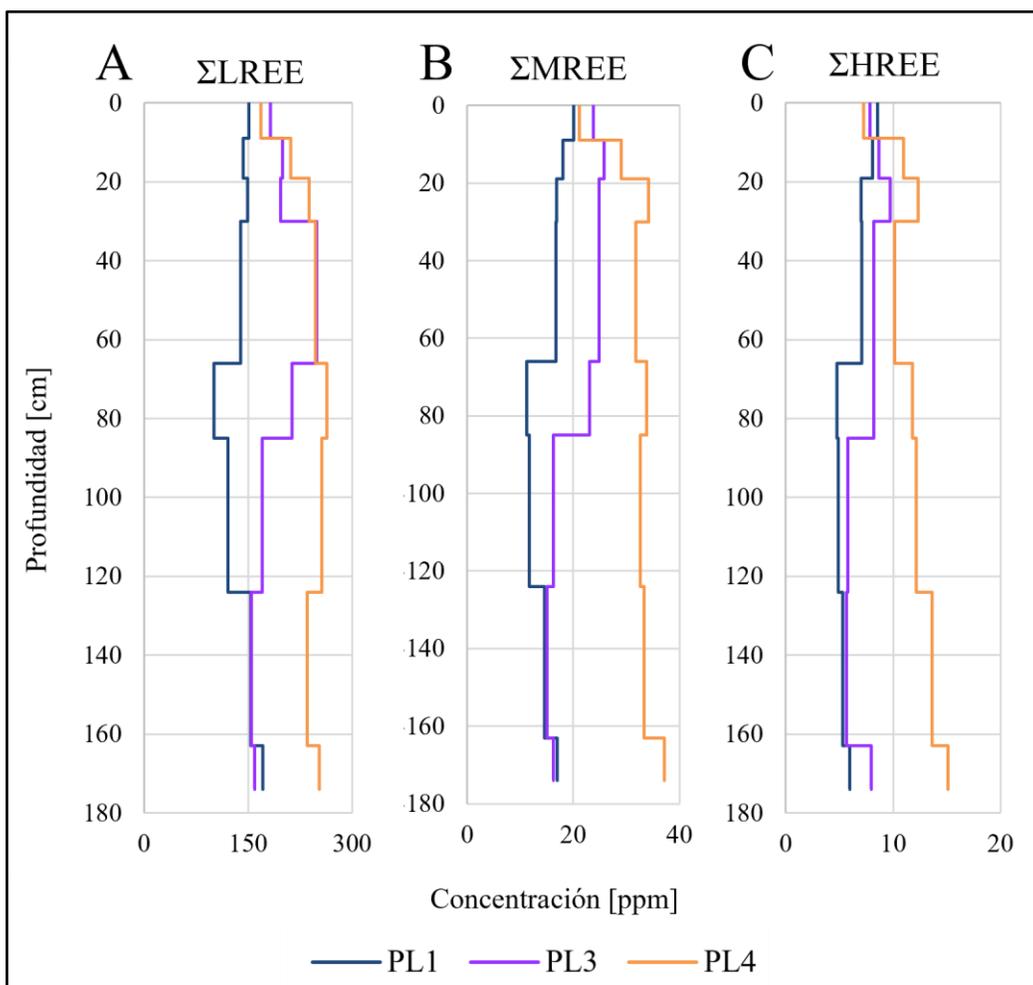


Figura 5.6: contenidos de la sumatoria de tierras raras (Σ LREE, Σ MREE, Σ HREE) en ppm a lo largo del perfil de suelo (profundidad) en cada sitio ubicado bajo uso de suelo de plantaciones de *Pinus sp.* En (A) concentraciones de Σ LREE. En (B) concentraciones de Σ MREE. En (C) concentraciones de Σ HREE.

Para el caso de las MREE (Anexo 6, Figura 5.6), se observan patrones de distribución claros. De manera similar a las LREE, el sitio PL4 presenta un aumento en la concentración a profundidades mayores, mientras que los sitios PL1 y PL3 exhiben disminución de las concentraciones de las MREE en profundidad. Sin embargo, se destaca que el elemento Europio en PL1 (Anexo 6) muestra un aumento de su contenido relacionado a la profundidad.

En los sitios de plantaciones, a diferencia de los nativos, si se logra reconocer patrones en las HREE (Anexo 7; Figura 5.6). Al igual que con las MREE, existen dos tendencias claras: el sitio PL4 tiende a aumentar sus contenidos de HREE a mayor profundidad, mientras que los sitios PL1 y PL3 tienden a disminuir sus contenidos ligeramente en profundidad. De la misma manera que los gráficos anteriores de profundidad, los elementos del mismo grupo (LREE, MREE, HREE) que provienen del mismo sitio tienden a comportarse de manera muy similar a lo largo del perfil de suelo.

5.4.3 Comparación del contenido de REE entre sitios

Para una comparación entre los seis sitios (BN1, BN2, BN4, PL1, PL3 y PL4), se presenta un diagrama tipo "boxplot" en la Figura 5.7 (ver Anexos 8, 9 y 10 para todos los boxplot) que muestra la suma (Σ) de las concentraciones de los diferentes grupos de tierras raras (LREE, MREE, HREE), con el objetivo de visualizar de manera gráfica la información proporcionada en las Tablas 5.3 y 5.4.

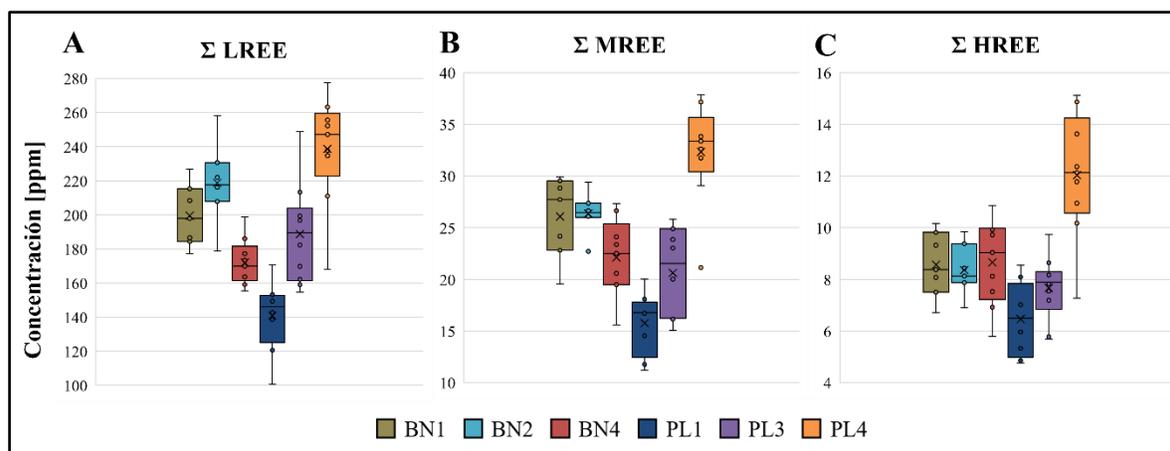


Figura 5.7: diagramas "boxplot" de la sumatoria de tierras raras en los seis sitios de estudio. En (A) concentraciones de Σ LREE. En (B) concentraciones de Σ MREE. En (C) concentraciones de Σ HREE.

En términos generales, las concentraciones de las REE no muestran una división en dos grupos marcados según el uso del suelo, sino que están bastante distribuidas. Sin embargo, los sitios PL exhiben una mayor dispersión de datos al comparar los diferentes sitios entre sí, como se señaló anteriormente. El sitio PL1 posee el menor contenido de todas las REE, mientras que PL4 presenta el mayor contenido de estos elementos.

5.5 Coeficiente de transferencia de masa

El coeficiente de transferencia de masa (τ_{ij}) se utiliza para evaluar la movilidad y la distribución que existe entre la roca parental y el suelo. Esto permite estimar las ganancias o pérdidas de los elementos constituyentes del suelo con respecto a su roca parental. En función de los resultados del cálculo de este coeficiente se establece si el horizonte o el suelo en general ha experimentado una pérdida o ganancia en sus constituyentes con respecto al material parental.

Tabla 5.5: coeficientes de transferencia de masa (τ_{ij}) para cada elemento de las REE en cada muestra de bosque nativo.

	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
BN1-1	0,21	0,06	0,13	0,11	0,04	-0,15	-0,06	-0,05	0,03	0,08	0,03	0,04	0,04	0,10
BN1-2	0,18	0,05	0,13	0,10	-0,05	-0,12	-0,13	-0,04	-0,04	0,00	0,00	0,11	0,16	0,21
BN1-3	0,04	-0,09	-0,03	-0,06	-0,17	-0,24	-0,22	-0,18	-0,15	-0,15	-0,13	-0,09	-0,06	0,00
BN1-4	-0,06	-0,16	-0,10	-0,12	-0,22	-0,23	-0,25	-0,16	-0,13	-0,13	-0,15	-0,06	-0,04	0,03
BN1-5	-0,25	-0,24	-0,28	-0,28	-0,35	-0,30	-0,39	-0,35	-0,32	-0,30	-0,31	-0,23	-0,19	-0,17
BN1-6	-0,29	-0,16	-0,30	-0,31	-0,40	-0,38	-0,42	-0,43	-0,37	-0,38	-0,37	-0,30	-0,28	-0,23
BN1-7	-0,33	-0,10	-0,37	-0,39	-0,47	-0,48	-0,52	-0,49	-0,45	-0,43	-0,42	-0,38	-0,36	-0,26
BN2-1	-0,08	-0,12	-0,16	-0,19	-0,26	-0,41	-0,30	-0,33	-0,30	-0,26	-0,25	-0,26	-0,28	-0,20
BN2-2	-0,06	-0,08	-0,12	-0,14	-0,25	-0,32	-0,30	-0,29	-0,28	-0,30	-0,27	-0,19	-0,17	-0,13
BN2-3	-0,08	-0,11	-0,13	-0,15	-0,22	-0,29	-0,31	-0,28	-0,29	-0,29	-0,30	-0,26	-0,20	-0,11
BN2-4	0,14	0,04	0,05	0,04	-0,10	-0,22	-0,20	-0,25	-0,24	-0,19	-0,22	-0,16	-0,09	0,02
BN2-5	0,36	0,14	0,23	0,17	-0,01	-0,20	-0,08	-0,08	-0,03	0,05	0,10	0,20	0,24	0,40
BN2-6	0,51	0,24	0,33	0,25	0,06	-0,27	-0,09	-0,13	-0,09	-0,06	-0,04	0,06	0,06	0,22
BN2-7	0,73	0,29	0,52	0,39	0,16	-0,18	0,00	0,02	-0,01	0,06	0,06	0,16	0,20	0,35
BN4-1	-0,08	-0,09	-0,09	-0,09	-0,12	-0,17	-0,09	-0,01	0,04	0,11	0,22	0,33	0,34	0,45
BN4-2	-0,11	-0,11	-0,13	-0,12	-0,17	-0,23	-0,17	-0,15	-0,08	-0,03	0,01	0,09	0,17	0,26
BN4-3	-0,17	-0,12	-0,26	-0,26	-0,31	-0,46	-0,28	-0,14	-0,11	-0,02	0,05	0,12	0,18	0,29
BN4-4	-0,10	-0,04	-0,18	-0,21	-0,29	-0,50	-0,32	-0,22	-0,24	-0,22	-0,18	-0,12	-0,10	-0,03
BN4-5	0,17	0,21	0,07	0,04	-0,07	-0,39	-0,11	-0,03	0,02	0,07	0,08	0,21	0,24	0,33
BN4-6	0,44	0,43	0,25	0,21	0,08	-0,28	0,11	0,22	0,31	0,42	0,56	0,75	0,81	0,96
BN4-7	0,44	0,36	0,26	0,20	-0,01	-0,19	0,02	0,13	0,13	0,20	0,23	0,36	0,43	0,59
BN4-8	0,52	0,41	0,17	0,04	-0,14	-0,42	-0,18	-0,07	-0,05	-0,05	-0,01	0,13	0,19	0,29
BN4-9	0,09	0,48	-0,02	-0,08	-0,17	-0,47	-0,23	-0,08	-0,06	0,01	0,09	0,22	0,27	0,43

Si τ_{ij} es negativo, indica un empobrecimiento del constituyente; si $\tau_{ij} = -1$ implica una pérdida total del elemento, por el contrario, si τ_{ij} es positivo, se infiere una ganancia o enriquecimiento del elemento, por otro lado, si $\tau_{ij} = 0$ o cercano a este, no existe una variación de la concentración entre la roca y el suelo, por lo que se considera un elemento inmóvil. A partir de los resultados que se muestran en las Tabla 5.5 y 5.6 se elaboran diagramas multielementos (Figuras 5.8 y 5.9) con los τ_{ij} de cada elemento y diagramas τ_{ij} v/s profundidad (Figuras 5.10 a 5.12) para cada elemento en cada uno de los sitios.

Tabla 5.6: coeficientes de transferencia de masa (τ_{ij}) para cada elemento de las REE en cada muestra de plantaciones.

	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
PL1-1	-0,16	-0,09	-0,24	-0,26	-0,32	-0,60	-0,33	-0,22	-0,15	-0,07	0,00	0,08	0,10	0,21
PL1-2	-0,26	-0,16	-0,35	-0,36	-0,44	-0,59	-0,41	-0,35	-0,27	-0,19	-0,13	-0,05	0,02	0,10
PL1-3	-0,18	-0,11	-0,39	-0,41	-0,47	-0,59	-0,45	-0,35	-0,35	-0,27	-0,26	-0,16	-0,13	0,08
PL1-4	-0,35	-0,14	-0,38	-0,39	-0,48	-0,57	-0,47	-0,34	-0,33	-0,26	-0,25	-0,13	-0,09	0,01
PL1-5	-0,43	-0,05	-0,48	-0,48	-0,53	-0,56	-0,48	-0,43	-0,38	-0,39	-0,32	-0,21	-0,13	-0,06
PL1-6	-0,31	0,43	-0,36	-0,35	-0,38	-0,43	-0,39	-0,34	-0,27	-0,17	-0,17	-0,08	0,01	0,10
PL1-7	-0,21	0,16	-0,32	-0,34	-0,43	-0,49	-0,46	-0,44	-0,41	-0,33	-0,32	-0,26	-0,25	-0,15
PL1-8	-0,09	0,32	-0,16	-0,17	-0,29	-0,29	-0,33	-0,31	-0,31	-0,30	-0,20	-0,14	-0,15	0,09
PL3-1	0,07	-0,11	-0,05	-0,11	-0,17	-0,36	-0,28	-0,21	-0,18	-0,15	-0,16	-0,12	-0,08	-0,03
PL3-2	0,08	-0,09	-0,03	-0,08	-0,22	-0,28	-0,22	-0,19	-0,18	-0,14	-0,13	-0,06	-0,06	-0,01
PL3-3	-0,04	-0,09	-0,14	-0,18	-0,29	-0,41	-0,35	-0,23	-0,15	-0,12	-0,07	0,01	0,02	0,15
PL3-4	0,28	0,43	0,10	0,00	-0,13	-0,29	-0,24	-0,21	-0,15	-0,15	-0,08	-0,04	-0,07	-0,01
PL3-5	0,08	0,17	-0,03	-0,13	-0,22	-0,29	-0,31	-0,31	-0,25	-0,24	-0,16	-0,09	-0,04	0,00
PL3-6	-0,13	0,08	-0,25	-0,33	-0,39	-0,45	-0,50	-0,42	-0,42	-0,40	-0,37	-0,33	-0,25	-0,19
PL3-7	-0,17	0,03	-0,31	-0,39	-0,45	-0,46	-0,49	-0,48	-0,44	-0,38	-0,35	-0,30	-0,25	-0,14
PL3-8	-0,14	0,01	-0,31	-0,38	-0,49	-0,49	-0,50	-0,33	-0,31	-0,25	-0,13	-0,04	0,05	0,12
PL3-9	-0,17	-0,11	-0,32	-0,36	-0,50	-0,58	-0,54	-0,47	-0,41	-0,31	-0,28	-0,21	-0,15	-0,04
PL3-10	0,12	0,05	-0,07	-0,20	-0,34	-0,44	-0,42	-0,31	-0,32	-0,24	-0,23	-0,14	-0,12	-0,02
PL4-1	0,12	0,02	-0,01	-0,07	-0,14	-0,43	-0,23	-0,16	-0,12	-0,08	-0,06	-0,02	0,00	0,11
PL4-2	0,19	0,05	0,07	0,01	-0,05	-0,31	-0,11	0,02	0,04	0,12	0,15	0,19	0,30	0,43
PL4-3	0,42	0,17	0,31	0,23	0,18	-0,11	0,07	0,21	0,24	0,30	0,39	0,49	0,45	0,61
PL4-4	0,61	0,44	0,41	0,33	0,21	-0,09	0,20	0,26	0,23	0,21	0,27	0,36	0,34	0,50
PL4-5	0,63	0,39	0,41	0,27	0,19	-0,18	0,12	0,16	0,24	0,33	0,32	0,39	0,46	0,63
PL4-6	1,06	0,68	0,75	0,60	0,44	-0,03	0,35	0,58	0,57	0,70	0,71	0,87	0,93	1,10
PL4-7	0,96	0,63	0,73	0,65	0,46	0,06	0,47	0,68	0,82	1,01	1,11	1,26	1,25	1,47
PL4-8	0,92	0,55	0,67	0,57	0,50	0,07	0,45	0,60	0,78	0,98	1,07	1,22	1,25	1,45
PL4-9	0,74	0,55	0,48	0,42	0,25	-0,06	0,31	0,47	0,61	0,70	0,76	0,90	0,91	1,03

Según lo mostrado en las Tablas 5.5 y 5.6, los valores calculados de τ_{ij} para las tierras raras varían de negativos a positivos, con valores mínimos y máximos de -0,52 (Gd; BN1-7) y 0,96 (Lu; BN4-6) para las muestras de suelos de bosque nativo, y de -0,6 (Eu; PL1-1) y 1,47 (Lu; PL4-7) para las muestras de plantaciones. En verde se destacan los elementos con $\tau_{ij} > 0,5$ y en rojo los elementos con $\tau_{ij} > -0,5$, destacando en cantidad los enriquecimientos altos por

sobre los grandes empobrecimientos, pero en general hay mayor cantidad de constituyentes que se encuentran empobrecidos con respecto al material parental.

5.5.1 Diagramas multielemento τ_{ij}

Para graficar los τ_{ij} de cada sitio de estudio se realizaron diagramas multielemento (Figuras 5.8 y 5.9), para cada parcela de estudio y para el promedio ponderado de cada sitio.

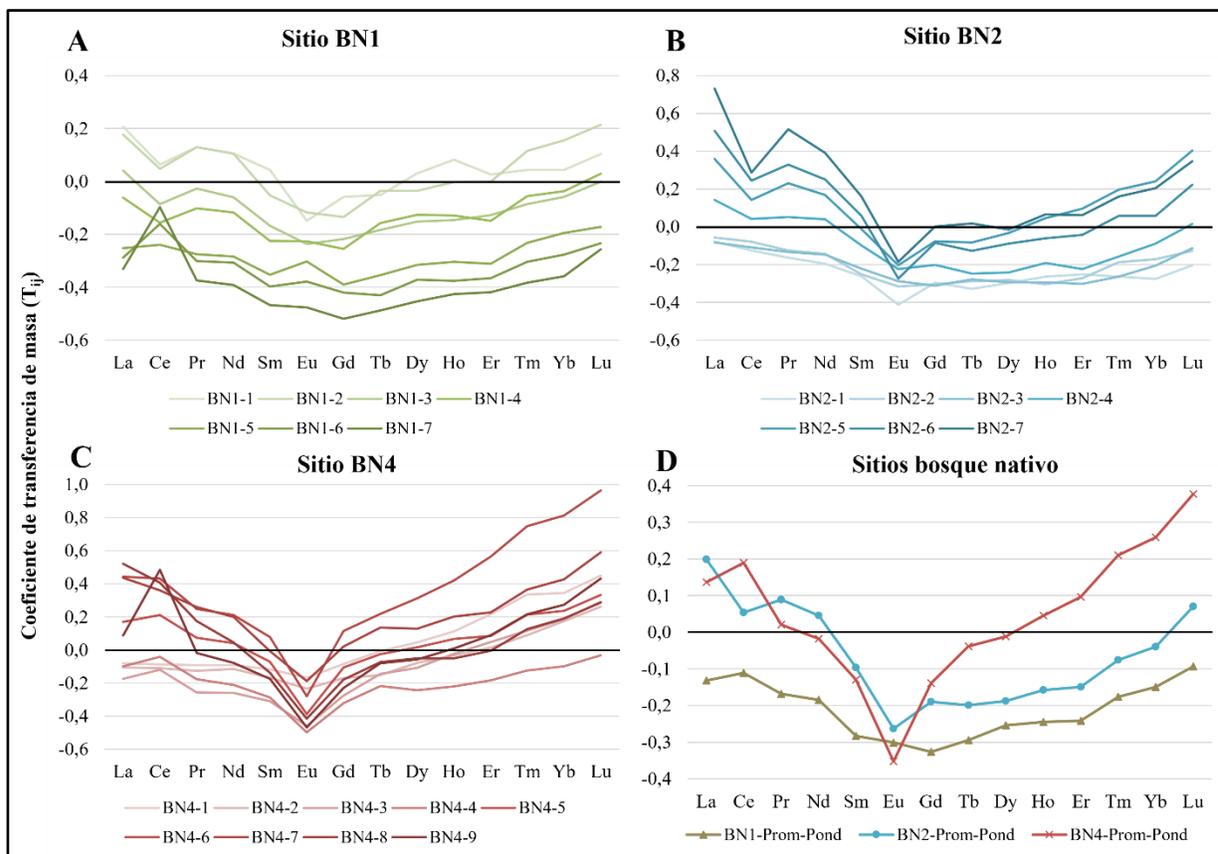


Figura 5.8: diagramas multielemento τ_{ij} para cada parcela de estudio. En (A) τ_{ij} por elemento para BN1. En (B) τ_{ij} por elemento para BN2. En (C) τ_{ij} por elemento para BN4. En (D) τ_{ij} del promedio ponderado de cada elemento en cada sitio de estudio.

En el caso de los sitios ubicados bajo bosque nativo (BN), se observa que existen elementos enriquecidos con respecto al material parental y otros empobrecidos, en términos generales existen valores de τ_{ij} mayores en las LREE y HREE y menores para las MREE. En el sitio BN1 (Figura 5.8A) los horizontes en general tienen una tendencia similar desde los elementos más livianos a los más pesados sin grandes variaciones de τ_{ij} , además, los coeficientes disminuyen su valor a medida que los horizontes son más profundos, siendo los horizontes

Oi y A1 los más enriquecidos y desde el horizonte B1 a B5 se encuentran empobrecidos. Por el contrario, para los sitios BN2 y BN4 (Figura 5.8 B y C), el τ_{ij} aumenta en profundidad, esto se evidencia mejor en el sitio BN2 (Figura 5.8B) donde sus horizontes profundos están mucho más enriquecidos que sus horizontes superficiales. Además, en ambos sitios los τ_{ij} tienden a disminuir desde el La hacia el Eu, y a aumentar desde el Eu al Lu.

En la Figura 5.8D se observan los promedios ponderados de cada elemento en los tres sitios, en estos también se marca la misma tendencia que en el caso de los sitios BN2 y BN4 una disminución del τ_{ij} desde el La al Eu; a excepción del Ce que en BN1 aumenta levemente y en BN4 presenta un pick positivo marcado, para luego un posterior enriquecimiento desde el Eu hacia los elementos más pesados como el Lu. También se observa que el sitio BN4 es el que presenta enriquecimiento en las HREE, mientras que BN1 se encuentra empobrecido con un $\tau_{ij} < 0$ en todos sus elementos.

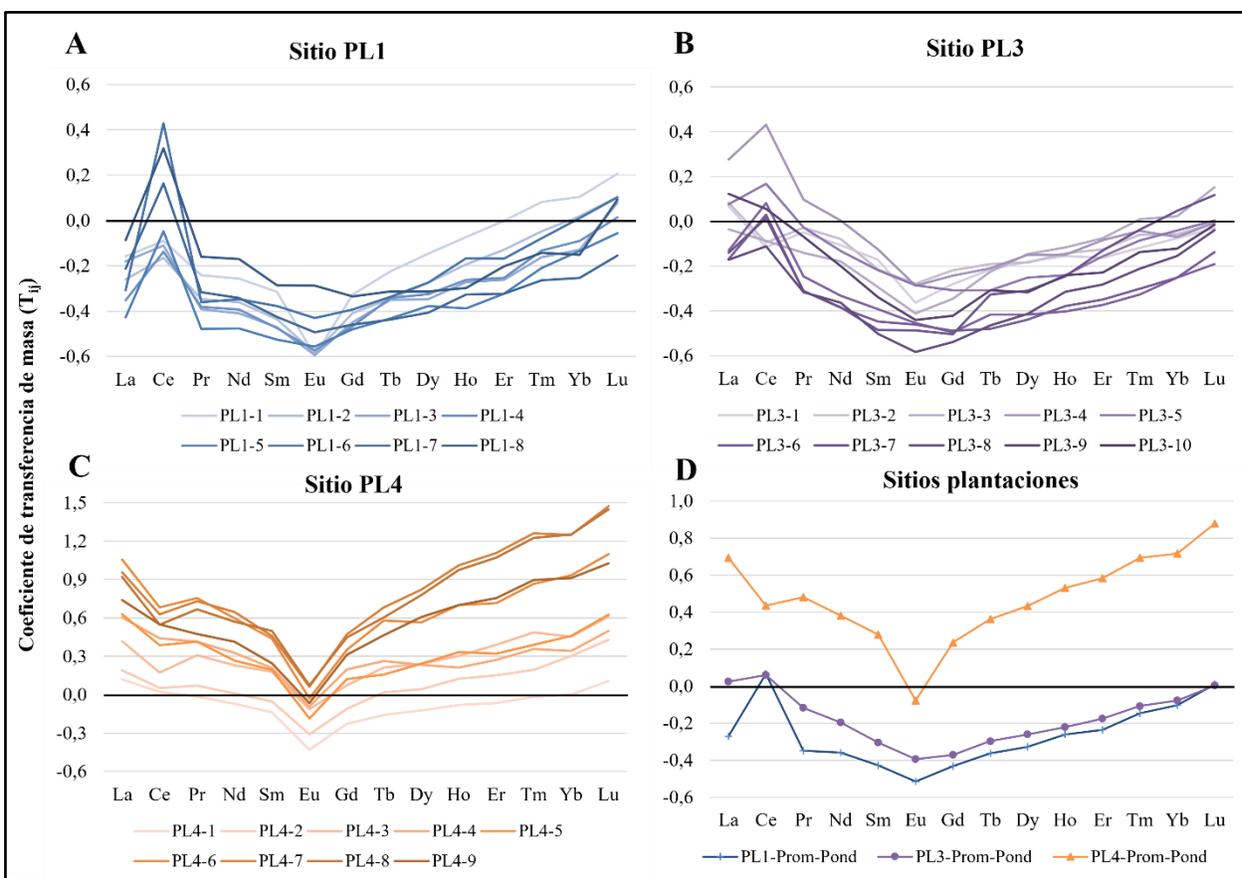


Figura 5.9: diagramas multielemento τ_{ij} para cada parcela de estudio. En (A) τ_{ij} por elemento para PL1. En (B) τ_{ij} por elemento para PL3. En (C) τ_{ij} por elemento para PL4. En (D) τ_{ij} del promedio ponderado de cada elemento en cada sitio de estudio.

Los elementos en los sitios bajo plantaciones presentan variados τ_{ij} , habiendo elementos enriquecidos y otros empobrecidos. Para el caso del sitio PL1 (Figura 5.9A), todas las muestras presentan un aumento del τ_{ij} hacia las HREE y una anomalía positiva marcada en el Ce, esta anomalía también la presentan algunas muestras del sitio PL3 (Figura 5.9B), además este último sitio presenta un menor empobrecimiento en los elementos más pesados y una disminución del τ_{ij} desde el Ce al Eu. Por otro lado, el sitio PL4 (Figura 5.9C) presenta todas sus muestras con un patrón similar con una disminución del τ_{ij} desde el La hasta el Eu, este último presentándose como una anomalía negativa y luego presentan un aumento paulatino hacia las HREE, además este sitio presenta el mayor enriquecimiento del estudio, con la gran mayoría de horizontes y elementos con τ_{ij} positivos, este enriquecimiento está marcado hacia los horizontes más profundos del perfil. En general, en la Figura 5.9D se observa claramente el enriquecimiento del sitio PL4 y su anomalía negativa del Eu, además se observa la anomalía positiva del τ_{ij} en el Ce que presenta el sitio PL1, siendo además este sitio el más empobrecido de los tres de plantaciones.

5.5.2 Coeficientes de transferencia de masa en profundidad

Con la elaboración de estos gráficos τ_{ij} v/s profundidad se busca evaluar si el τ_{ij} aumenta o disminuye en profundidad en los sitios, además de comparar los sitios entre sí y verificar si existe algún horizonte que posea un enriquecimiento empobrecimiento marcado.

Para el caso de las LREE (Figura 5.10) en general cada sitio de BN y PL presentan un patrón similar en cada uno de los cuatro elementos. Algo a destacar es que el sitio BN1 es el único sitio que presenta un empobrecimiento en profundidad (Figura 5.10). El sitio PL4 es el sitio más enriquecido y en su horizonte B3 (81-99 cm) es donde se encuentran los τ_{ij} más altos. Por otro lado, el sitio BN2 presenta un aumento del τ_{ij} en profundidad, algo similar ocurre en los sitios BN4 y PL4, pero no de forma tan definida. El perfil de PL3 es algo más sinuoso con un pick de τ_{ij} en su horizonte B3 (44-66 cm), luego disminuye su τ_{ij} y en el horizonte B9 aumenta levemente. El sitio PL1 presenta todos sus elementos empobrecidos a excepción del Ce (Figura 10B) que presenta un pick positivo en el horizonte B3 (85-124 cm).

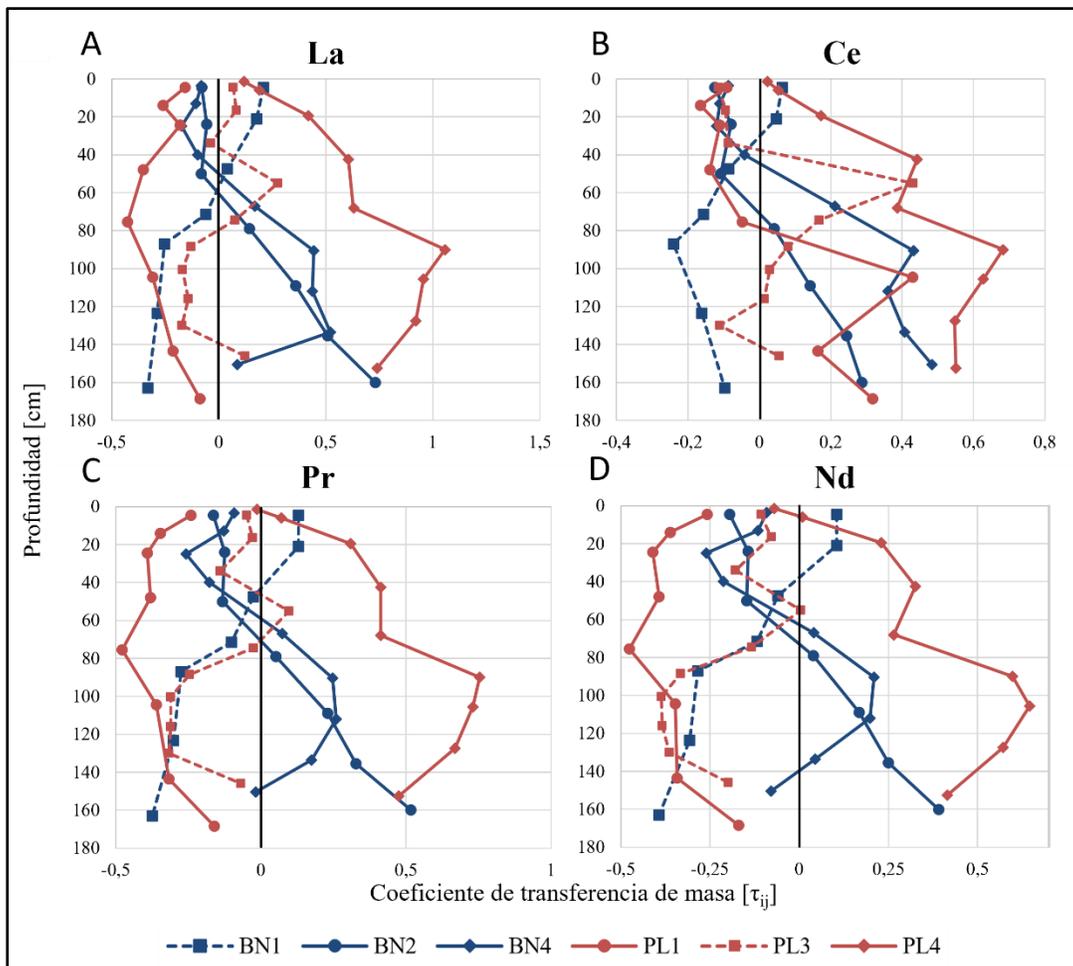


Figura 5.10: gráficos de profundidad v/s τ_{ij} para las LREE de las seis parcelas de estudio. En (A) τ_{ij} para el lantano (La). En (B) τ_{ij} para el cerio (Ce). En (C) τ_{ij} para praseodimio (Pr). En τ_{ij} (D) para el neodimio (Nd).

El caso de las MREE (Figura 5.11) es al de las LREE donde el patrón en profundidad de cada sitio es similar en cada uno de los constituyentes. También se repite la disminución del τ_{ij} para el sitio BN1. Se ven dos pick de enriquecimiento marcados, para PL4 y BN4, en el horizonte B4 (99-112 cm) y B4 (85-96 cm) respectivamente. El caso de BN2 también es similar, ya que aumenta paulatinamente su τ_{ij} con la profundidad. Para BN4 se presenta una disminución del coeficiente hasta el horizonte B2 (31-49 cm), luego un aumento hasta B4 y finalmente una nueva disminución hacia los horizontes más profundos. Para PL1 el perfil en profundidad es sinuoso, pero por lo general el horizonte más profundo presenta un menor τ_{ij} que el horizonte más superficial, a excepción del Eu. En profundidad el τ_{ij} para PL3 aumenta y disminuye, pero sin presentar grandes cambios, finalmente, PL4 presenta un aumento desde la superficie hasta el horizonte B2 (55-81 cm) donde tiene un leve pick negativo para luego

aumentar hasta el horizonte B4, y en el tramo final comenzar a disminuir hacia los horizontes más profundos.

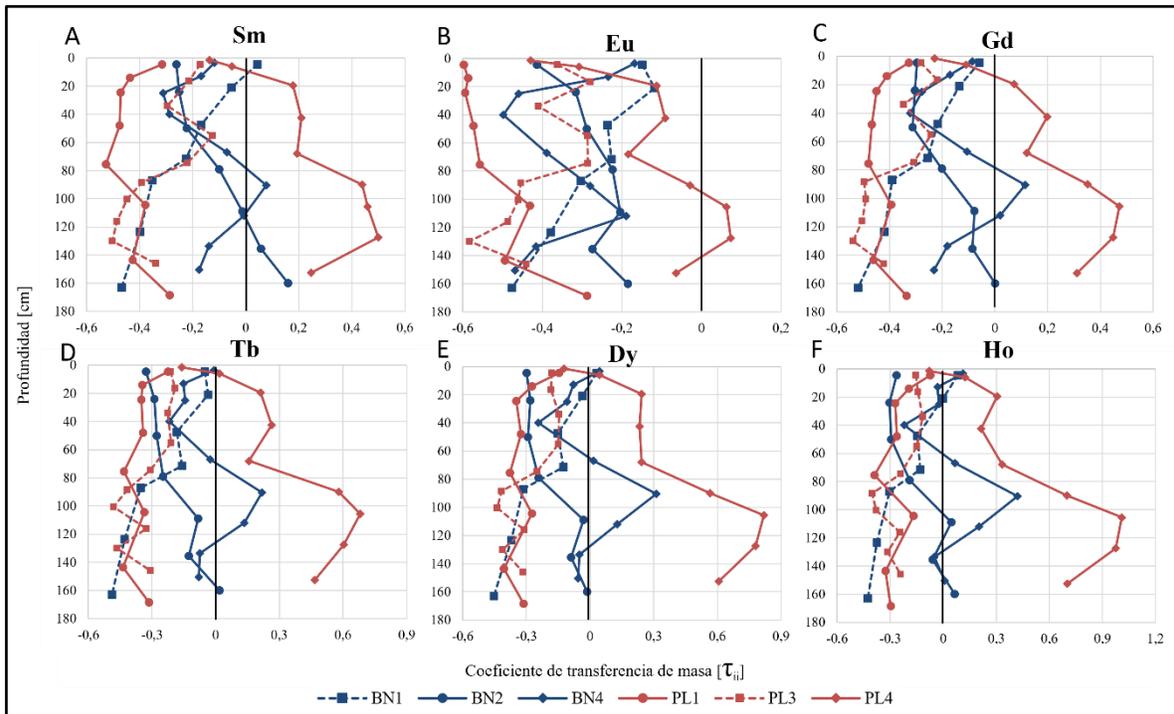


Figura 5.11: gráficos de profundidad v/s τ_{ij} para las MREE de las seis parcelas de estudio. En (A) τ_{ij} para el samario (Sm). En (B) τ_{ij} para el europio (Eu). En (C) τ_{ij} para gadolinio (Gd). En (D) τ_{ij} para el terbio (Tb). En (E) τ_{ij} para el disprosio (Dy). En (F) τ_{ij} para el holmio.

En el grupo de las HREE los patrones también se repiten en cada elemento (Figura 5.12), y al igual que para las MREE los sitios PL4 y BN4 repiten sus pick de τ_{ij} en los mismos horizontes (B4 en ambos casos). El sitio BN1 también presenta empobrecimiento en profundidad y el sitio BN2 enriquecimiento, pero este último con un leve pick en el horizonte B4 (100-122 cm). El sitio BN4 presenta el mismo patrón que en las MREE con disminución hasta el horizonte B2, luego aumento hasta B4 y una posterior disminución en profundidad, cabe destacar que este es el sitio con mayores τ_{ij} de los sitios de bosque nativo y, en general, solo por detrás del sitio PL4. Los sitios PL1 y PL3 presentan bastantes fluctuaciones en sus τ_{ij} , pero numéricamente no existen grandes diferencias. Finalmente, PL4 presenta un patrón similar de distribución al de las MREE y se ve claramente en conjunto con las Figuras 5.10 y 5.11 que es el sitio con mayor τ_{ij} y por ende con un mayor enriquecimiento.

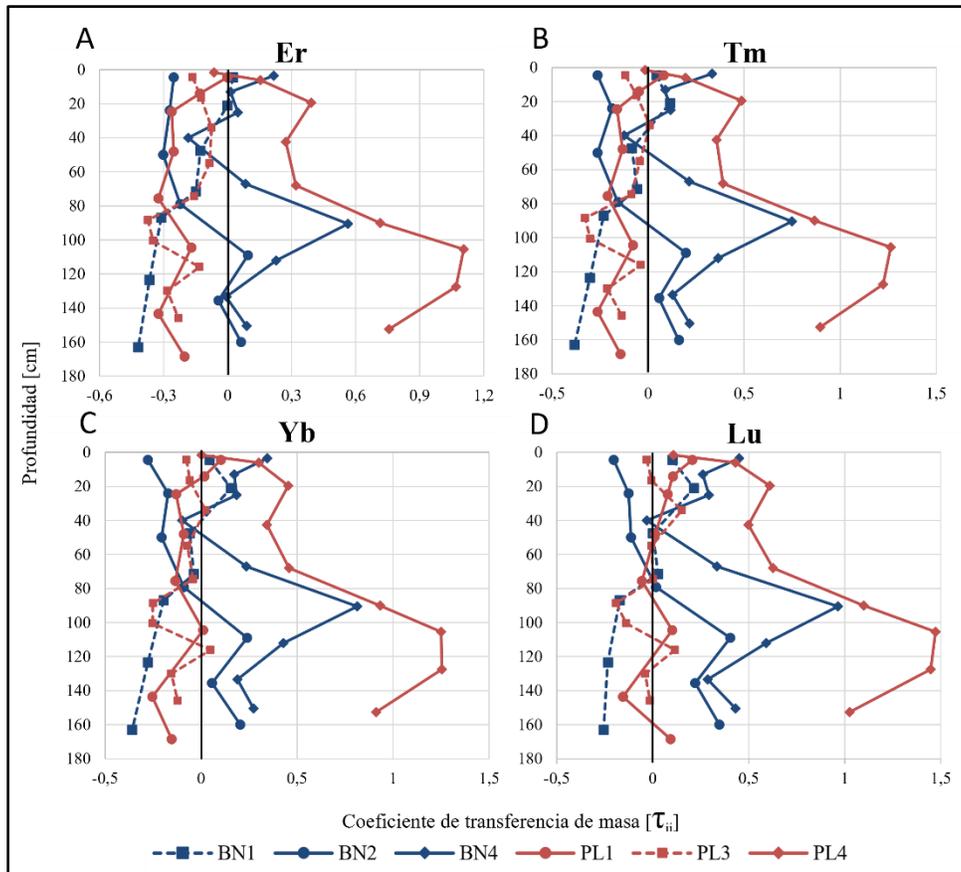


Figura 5.12: gráficos de profundidad v/s τ_{ij} para las LREE de las seis parcelas de estudio. En (A) τ_{ij} para el erbio (Er). En (B) τ_{ij} para el tulio (Tm). En (C) τ_{ij} para iterbio (Yb). En τ_{ij} (D) para el lutecio (Lu).

En general, en las Figuras 5.10 a 5.12 no se ven diferencias muy marcadas entre el comportamiento en profundidad de sitios bajo plantaciones con respecto a los de bosque nativo. En lo que respecta a los grupos de tierras raras, el grupo que presenta un mayor enriquecimiento es el de la HREE.

En el Anexo 11 se observa que los elementos que conforman un grupo de las tierras raras (LREE, MREE o HREE) presentan un comportamiento similar en profundidad, esto se ve reflejado en los tres sitios. Para el caso del sitio BN1 (Anexo 11 A, B y C) se ve el claro patrón de empobrecimiento en profundidad reconocido en las Figuras 5.10 a 5.12, el único elemento que tiene un patrón diferente sería el Ce que desde el horizonte B3 (81-93 cm) los comienza a aumentar su τ_{ij} , por el contrario, BN2 (Anexo 11 D, E y F) presenta un enriquecimiento hacia los horizontes inferiores. En BN4 (Anexo 11 G, H e I) se observa los mismos patrones de disminución, aumento y luego disminución del τ_{ij} . Algo a destacar en las HREE (Anexo 11 C, F e I) es que el τ_{ij} aumenta desde el Er al Lu.

En el caso de los sitios bajo plantaciones de pino tenemos que, para PL1 (Anexo 12 A, B y C) existen patrones similares en cada uno de los grupos de REE, a excepción de las LREE donde el Ce posee un enriquecimiento mayor y del Eu (MREE) que en profundidad su τ_{ij} es menor que el de los otros elementos, y se mantiene relativamente similar en los primeros horizontes (horizonte A1 a horizonte B2), además hay un aumento marcado del τ_{ij} en el horizonte B3. En PL3 (Anexo 12, D, E y F), el Ce también se encuentra más enriquecido entre las LREE, en las MREE existen dos patrones de distribución uno del Sm al Gd y otro del Tb al Ho, el primero coincide con el de las LREE y presenta un pick de τ_{ij} en el horizonte B3 (44-66 cm), mientras que el segundo coincide con el patrón de las HREE y presenta un pick de enriquecimiento en el horizonte B7 (107-125cm). Algo similar a lo que ocurre con PL3 ocurre con el sitio PL4 (Anexo 12 G, H e I) en lo que a las MREE respecta, desde el Gd hacia las LREE presenta el mismo patrón en profundidad, mientras que desde el Tb hacia las HREE ocurre lo mismo. Las LREE tienen un τ_{ij} más alto en el horizonte B3 (81-99 cm) y el La es el más enriquecido. Para el caso de las MREE el Eu es el que se diferencia de los otros ya que presenta un τ_{ij} menor. Las HREE presentan el mismo patrón en profundidad y tienen un pick en el horizonte B4 (99-112 cm) el cual se repite en Tb, Dy y Ho (MREE). De igual manera que las muestras de BN las HREE (Anexo 12 C, F e I) aumentan su coeficiente de transferencia de masa a medida que se hacen más pesadas, es decir aumentan desde el Er al Lu.

5.6 Materia Orgánica

Los porcentajes de materia orgánica (MO) para cada sitio se presentan en la Tabla 5.7 y su distribución en profundidad se observan en la Figura 5.13.

Los contenidos de materia orgánica más altos se encuentran en el horizonte superficial de cada sitio y después comienzan a disminuir a medida que se profundizan (Figura 5.13). El sitio PL4 es el sitio que posee mayor contenido de MO en su horizonte superficial con un valor de 5,14%. Para el caso de los sitios en bosque nativo el sitio BN2 es el que posee un mayor contenido con 4,18% en el horizonte superficial, finalmente, el sitio que tiene un menor contenido de MO en el horizonte superficial es el sitio PL3 con un contenido de 1,49%. En general todos los sitios en su último horizonte presentan valores cercanos a 0.1% o menores, a excepción del sitio BN1 que casi cuadruplica este valor. Todos los sitios

disminuyen sus contenidos en profundidad, sin embargo, el sitio BN1 es el sitio que presenta menores disminuciones en los contenidos al ser comparado con los otros sitios, el sitio BN2 también presenta una disminución menor hasta los 80 cm aproximadamente. Por otro lado, el sitio BN4 se comporta de manera diferente a los sitios de bosque nativo y su comportamiento en profundidad y contenidos son similares a los sitios de plantaciones.

Tabla 5.7: contenidos de materia orgánica para cada muestra.

Muestra	Hz	MO (%)	Muestra	Hz	MO (%)	Muestra	Hz	MO (%)
BN1-1	Oi	3.97	BN2-1	A	4.18	BN4-1	A1	2.51
BN1-2	A1	1.23	BN2-2	B1	1.04	BN4-2	A2	1.21
BN1-3	B1	0.67	BN2-3	B2	0.51	BN4-3	B1	0.57
BN1-4	B2	0.62	BN2-4	B3	0.29	BN4-4	B2	0.28
BN1-5	B3	0.55	BN2-5	B4	0.15	BN4-5	B3	0.13
BN1-6	B4	0.46	BN2-6	B5	0.11	BN4-6	B4	0.08
BN1-7	B5	0.39	BN2-7	B6	0.06	BN4-7	B5	0.07
						BN4-8	B6	0.04
						BN4-9	B7	0.02
Muestra	Hz	MO (%)	Muestra	Hz	MO (%)	Muestra	Hz	MO (%)
PL1-1	A1	2.76	PL3-1	O	1.49	PL4-1	A1	5.14
PL1-2	A2	1.26	PL3-2	A	1.17	PL4-2	A2	1.41
PL1-3	A3	0.79	PL3-3	B1	0.59	PL4-3	A3	1.20
PL1-4	B1	0.29	PL3-4	B2	0.25	PL4-4	B1	0.52
PL1-5	B2	0.12	PL3-5	B3	0.22	PL4-5	B2	0.18
PL1-6	B3	0.09	PL3-6	B4	0.16	PL4-6	B3	0.11
PL1-7	B4	0.06	PL3-7	B5	0.13	PL4-7	B4	0.06
PL1-8	B5	0.05	PL3-8	B6	0.12	PL4-8	B5	0.06
			PL3-9	B7	0.13	PL4-9	Cr	0.07
			PL3-10	B8	0.12			

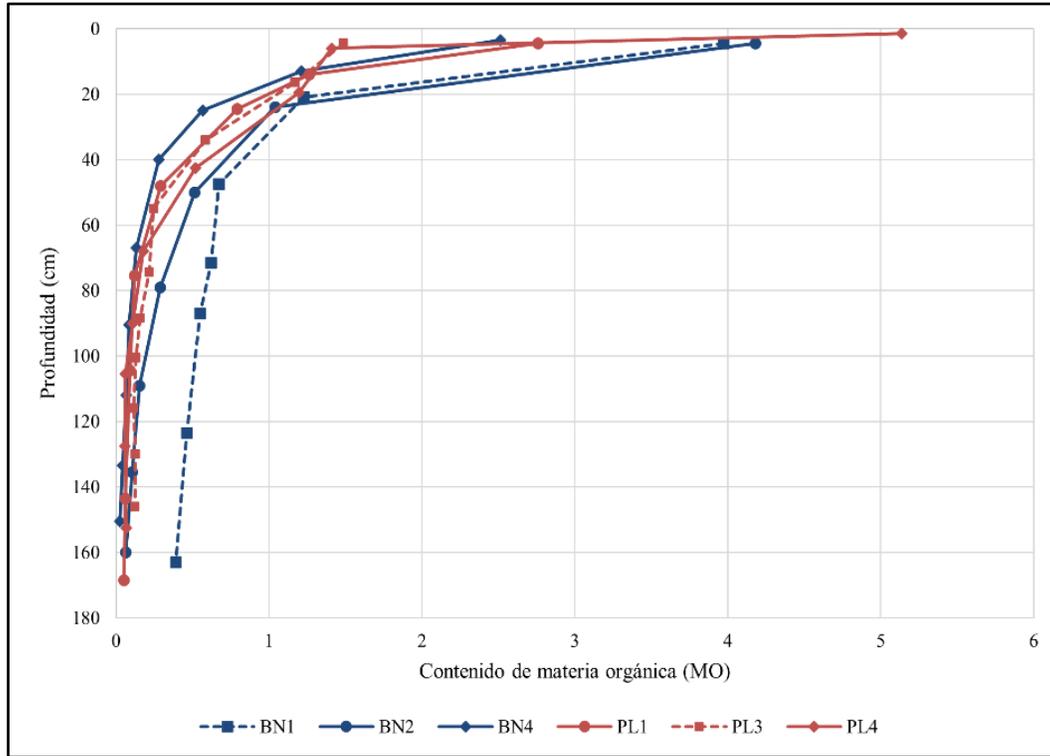


Figura 5.13: gráfico profundidad v/s materia orgánica (%).

5.7 Matrices de correlación

Se realiza una matriz de correlación para cada uso de suelo (Tablas 5.8 y 5.9), donde se consideran las concentraciones de REE, los contenidos de materia orgánica y la profundidad media de cada horizonte, para establecer relaciones entre esta información. En las tablas se destacan las correlaciones negativas menores a -0.5 en color rojo, en color amarillo las correlaciones positivas entre 0.5 - 0.8 y en verde las correlaciones positivas mayores a 0.8.

Tanto en los sitios ubicados bajo bosque nativo (Tabla 5.8) y plantaciones (Tabla 5.9) las REE tienen correlaciones positivas entre sí, esto debido a que tienen comportamientos geoquímicos similares, sin embargo, las correlaciones más altas se dan entre los elementos del grupo de la HREE para los suelos bajo BN, a diferencia de los sitios bajo plantaciones donde la gran mayoría de la REE tienen altas correlaciones positivas entre sí. Con respecto a la MO y la profundidad estas tienen una correlación alta negativa en ambos sitios. La MO con las REE en la mayoría de los elementos de BN tienen una correlación positiva, pero no muy alta, ya que no superan los 0,3, esto ocurre principalmente en las MREE, por otro lado,

en los sitios de plantaciones todas las correlaciones son negativas a excepción del Sm. En lo relativo a las relaciones entre profundidad y contenidos de REE, el Ce es el único elemento que tiene una correlación positiva considerable de 0,4 en BN y 0,28 en PL, en BN desde el Nd al Lu las correlaciones son negativas y más altas en las MREE, de Gd a Er varían entre -0.38 a -0.45, mientras que en PL si bien la mayoría posee correlaciones negativas, ninguna es menor a -0,15.

Tabla 5.8: matriz de correlación REE, MO y profundidad para sitios de bosque nativo.

	MO	Prof.	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
MO	1															
Prof.	-0,67	1														
La	-0,08	0,17	1													
Ce	-0,27	0,46	0,67	1												
Pr	0,00	0,05	0,97	0,69	1											
Nd	0,05	-0,05	0,93	0,67	0,99	1										
Sm	0,20	-0,22	0,84	0,57	0,94	0,97	1									
Eu	0,24	-0,32	0,50	0,41	0,68	0,76	0,83	1								
Gd	0,26	-0,38	0,72	0,40	0,84	0,89	0,95	0,84	1							
Tb	0,15	-0,42	0,56	0,30	0,68	0,73	0,80	0,74	0,91	1						
Dy	0,24	-0,45	0,46	0,21	0,60	0,67	0,76	0,75	0,90	0,97	1					
Ho	0,23	-0,41	0,45	0,18	0,56	0,63	0,71	0,64	0,86	0,94	0,97	1				
Er	0,18	-0,41	0,32	0,09	0,42	0,48	0,56	0,49	0,76	0,87	0,92	0,96	1			
Tm	0,04	-0,31	0,31	0,11	0,40	0,45	0,51	0,45	0,71	0,85	0,89	0,93	0,98	1		
Yb	-0,04	-0,28	0,29	0,12	0,38	0,44	0,49	0,45	0,69	0,84	0,86	0,91	0,96	0,99	1	
Lu	-0,10	-0,17	0,35	0,20	0,41	0,46	0,49	0,39	0,67	0,80	0,81	0,88	0,94	0,97	0,98	1

Tabla 5.9: matriz de correlación REE, MO y profundidad para sitios de plantaciones.

	MO	Prof.	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
MO	1															
Prof.	-0,66	1														
La	-0,06	-0,01	1													
Ce	-0,32	0,28	0,86	1												
Pr	-0,04	-0,05	0,99	0,84	1											
Nd	-0,02	-0,07	0,98	0,82	1,00	1										
Sm	0,02	-0,11	0,97	0,80	0,99	0,99	1									
Eu	-0,15	0,01	0,93	0,84	0,95	0,95	0,94	1								
Gd	0,00	-0,09	0,95	0,77	0,96	0,98	0,98	0,91	1							
Tb	-0,01	-0,08	0,94	0,73	0,95	0,96	0,97	0,88	0,99	1						
Dy	-0,01	-0,06	0,92	0,72	0,93	0,95	0,95	0,86	0,98	0,99	1					
Ho	-0,03	-0,02	0,90	0,69	0,91	0,93	0,93	0,83	0,96	0,98	0,99	1				
Er	-0,04	-0,01	0,89	0,70	0,90	0,92	0,92	0,83	0,95	0,98	0,99	1,00	1			
Tm	-0,06	0,01	0,88	0,68	0,88	0,91	0,91	0,81	0,94	0,97	0,99	0,99	1,00	1		
Yb	-0,07	0,00	0,87	0,66	0,87	0,89	0,89	0,79	0,93	0,96	0,98	0,99	0,99	1,00	1	
Lu	-0,08	0,02	0,86	0,65	0,86	0,88	0,88	0,78	0,92	0,96	0,97	0,99	0,99	0,99	0,99	1

5.7.1 Matrices incluyendo textura de suelo

Para realizar estas matrices de correlación no se pudo utilizar todas las muestras, ya que por temas de tiempos no se logró obtener la textura de todas. Para realizar la matriz se utilizó un total de 26 muestras (7 de BN1, 2 de BN2, 2 de BN4, 7 de PL1, 3 de PL3 y 4 de PL4), las muestras y los resultados se muestran en Anexo 14.

En las Tablas 5.10 y 5.11 se muestra la matriz para los sitios bajo bosque nativo y plantaciones de pino respectivamente. Con respecto a la relación entre las REE, MO-REE y REE-profundidad se muestran correlaciones similares a las ya mencionadas en las Tablas 5.8 y 5.9, a excepción de la MO en los sitios de PL (Tabla 5.11) que tiene valores positivos, pero estos no superan los 0.3; solo el limo super este valor (0.51). Con respecto a los valores obtenidos de la textura del suelo (% arena, % limo y % arcilla) se tiene para la arcilla valores de correlación negativos en ambos sitios, a excepción del Eu que tiene un valor de 0,24 para BN y de 0,01 para PL, este último valor indica una correlación nula entre ambos constituyentes. Los valores de correlación negativos no superan los -0,36 para las REE, por lo que no existe una correlación negativa marcada. Para el caso del limo, la gran mayoría de los elementos posee correlaciones negativas tanto para BN como para PL, las muestras de BN poseen una correlación negativa que no supera los -0,3 y que es bastante menor que para las muestras de PL, las que presentan correlaciones negativas más altas que van desde -0,46 (Lu) hasta los -0,82 (Ce), esto indicaría que a mayores contenidos de limo habrá menores concentraciones de REE y viceversa. Por el contrario, para los contenidos de arena todas las correlaciones son positivas a excepción del Eu en BN, para los sitios de bosque nativo las correlaciones positivas son bastante considerables, ya que la mayoría rondan los 0,4, el elemento que posee una mayor relación es el La con un valor de 0,59. Por otro lado, para los sitios bajo plantaciones de pino las correlaciones positivas son bastante más altas, ya que todos los valores van entre 0,56 (Yb) hasta 0,81 (Ce), las correlaciones más altas se presentan en las LREE y esto significa que a mayores contenidos de arena en los suelos habrá mayores concentraciones de REE en los sitios bajo plantaciones y viceversa.

Tabla 5.10: matriz de correlación REE, MO, textura de suelo y profundidad para sitios de bosque nativo.

	MO	Prof.	Arcilla	Limo	Arena	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
MO	1																		
Prof.	-0,61	1																	
Arcilla	-0,42	0,11	1																
Limo	0,14	0,08	-0,45	1															
Arena	0,30	-0,18	-0,60	-0,45	1														
La	0,02	0,10	-0,35	-0,27	0,59	1													
Ce	-0,18	0,53	-0,23	0,08	0,16	0,71	1												
Pr	0,08	0,02	-0,27	-0,26	0,51	0,98	0,71	1											
Nd	0,13	-0,05	-0,23	-0,27	0,47	0,95	0,69	0,99	1										
Sm	0,29	-0,20	-0,26	-0,24	0,47	0,91	0,57	0,96	0,98	1									
Eu	0,24	-0,20	0,24	-0,11	-0,14	0,47	0,44	0,62	0,70	0,73	1								
Gd	0,28	-0,34	-0,19	-0,29	0,46	0,81	0,40	0,88	0,91	0,96	0,74	1							
Tb	0,22	-0,40	-0,22	-0,20	0,40	0,72	0,29	0,78	0,81	0,84	0,67	0,92	1						
Dy	0,35	-0,46	-0,18	-0,18	0,34	0,57	0,17	0,65	0,70	0,77	0,70	0,90	0,96	1					
Ho	0,36	-0,44	-0,33	-0,16	0,47	0,64	0,21	0,70	0,74	0,80	0,62	0,92	0,95	0,98	1				
Er	0,21	-0,42	-0,34	-0,16	0,49	0,53	0,09	0,56	0,59	0,65	0,43	0,81	0,88	0,92	0,95	1			
Tm	0,07	-0,34	-0,26	-0,22	0,45	0,51	0,09	0,53	0,56	0,59	0,41	0,76	0,86	0,88	0,92	0,98	1		
Yb	0,01	-0,33	-0,21	-0,22	0,40	0,48	0,09	0,52	0,55	0,58	0,41	0,75	0,82	0,85	0,89	0,96	0,99	1	
Lu	-0,07	-0,21	-0,31	-0,13	0,42	0,54	0,20	0,55	0,58	0,58	0,35	0,73	0,78	0,79	0,85	0,93	0,96	0,98	1

Tabla 5.11: matriz de correlación REE, MO, textura de suelo y profundidad para sitios de plantaciones

	MO	Prof.	Arcilla	Limo	Arena	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
MO	1																		
Prof.	-0,50	1																	
Arcilla	-0,09	-0,11	1																
Limo	0,51	-0,08	-0,12	1															
Arena	-0,44	0,13	-0,37	-0,88	1														
La	0,08	-0,18	-0,10	-0,74	0,74	1													
Ce	-0,24	0,12	-0,07	-0,82	0,81	0,83	1												
Pr	0,11	-0,17	-0,11	-0,72	0,73	0,99	0,81	1											
Nd	0,13	-0,19	-0,12	-0,68	0,70	0,99	0,80	1,00	1										
Sm	0,15	-0,17	-0,16	-0,65	0,69	0,98	0,78	0,99	0,99	1									
Eu	-0,03	-0,12	0,01	-0,73	0,68	0,93	0,80	0,95	0,95	0,94	1								
Gd	0,18	-0,22	-0,18	-0,62	0,67	0,97	0,71	0,98	0,99	0,99	0,91	1							
Tb	0,24	-0,26	-0,20	-0,55	0,61	0,94	0,65	0,95	0,96	0,97	0,87	0,99	1						
Dy	0,24	-0,25	-0,22	-0,56	0,63	0,94	0,65	0,95	0,96	0,97	0,85	0,99	1,00	1					
Ho	0,24	-0,24	-0,24	-0,54	0,62	0,92	0,61	0,93	0,94	0,95	0,81	0,97	0,99	1,00	1				
Er	0,26	-0,29	-0,23	-0,52	0,60	0,91	0,61	0,92	0,93	0,94	0,81	0,97	0,99	0,99	1,00	1			
Tm	0,27	-0,29	-0,24	-0,50	0,58	0,89	0,58	0,90	0,92	0,93	0,79	0,96	0,98	0,99	0,99	1,00	1		
Yb	0,28	-0,31	-0,23	-0,48	0,56	0,87	0,54	0,89	0,90	0,91	0,76	0,95	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99	1	
Lu	0,26	-0,35	-0,28	-0,46	0,57	0,87	0,55	0,88	0,89	0,91	0,76	0,94	0,97	0,97	0,98	0,98	0,99	0,99	1

6 DISCUSIÓN

6.1 Factores que controlan la distribución de las REE

Existen diversos factores que controlan la distribución y los contenidos de las REE, estos pueden ser, el material parental, clima, topografía, pH, textura del suelo, grado de meteorización, contenidos de materia orgánica (MO), entre otros. Un factor principal reconocido en diversos estudios (Silva y otros, 2018; Castillo, 2018; Mihajlovic y otros, 2019; Rodríguez y otros, 2018) es el material parental formador del suelo, destacando las rocas ígneas ácidas como el material parental que tiene mayores contenidos de REE (Silva y otros, 2018). El pH del suelo es otro factor importante que puede controlar la movilización de las REE raras en los suelos (Aubert y otros, 2000). Para este estudio el material parental es un factor controlador de primer orden, ya que el patrón de distribución de REE para todos los sitios sigue el mismo patrón de la roca parental (Figuras 5.3 y 5.4). Sin embargo, al estar los sitios en plantaciones de *Pinus sp.* y en bosque nativo ubicados bajo el mismo material parental (rocas graníticas pertenecientes al Batolito Costero del sur), la roca caja no sería la que produce las diferencias en la distribución y contenido entre los sitios en cuestión.

Factores como la textura del suelo (porcentaje de arcillas, limo y arena) pueden controlar la distribución de las REE, diversos autores (Hu y otros, 2006; Braun y otros, 1993; Bustos y otros, 2022) describen la fracción de arcilla del suelo como la de mayor relación con las REE. Hu y otros (2006) describe que la fracción arcilla está compuesta por minerales de arcilla como illita, caolinita y esmectita, así como óxidos metálicos hidratados de Fe, Mn y Al. Los óxidos de Fe y Mn tienen la capacidad de co-precipitar y adsorber cationes de la solución, influenciados por su carga, dependiente del pH (Alloway, 1995). Se ha sugerido que estos óxidos metálicos desempeñan un papel fundamental en la acumulación de tierras raras (REE) en los suelos (Peng y Wang, 1996). Para el caso de estudio se presenta un total de 26 de las 50 muestras con su textura completa, y al relacionarlas con las REE mediante una correlación de Pearson, se obtuvo que las REE tienen una mayor relación con la fracción arena en los sitios de plantaciones, sin embargo, esta información puede verse influenciada por la cantidad de muestras de PL1 (7) a diferencia de las 2 muestras de PL3 y 4 de PL4, ya

que el sitio PL1 es el sitio con menores contenidos de REE del estudio. Si se repitiese esta tendencia al considerar el total de muestras, se podría investigar a mayor detalle

La materia orgánica (MO) también puede ser un factor controlador, en estudios como el de Wiche y otros (2017) la MO y las concentraciones de REE presentan una correlación positiva, lo que significa que al aumentar una aumenta la otra, sin embargo estudios como el de Han y otros (2016) muestran una correlación negativa muy baja entre ambos factores en los sitios de plantaciones, al igual que en este estudio, donde principalmente las REE poseen correlaciones negativas muy bajas con la MO en los sitios de plantaciones, esto resulta llamativo porque, si se ve específicamente los sitios con mayores contenidos de MO (PL4 y BN2) son los sitios que mayor contenido de REE poseen, sin embargo estas nulas correlaciones en PL, pueden estar influenciadas por la alta variabilidad en los contenidos de REE que se registró en los sitios de plantaciones (Figura 5.4). Por otra parte, se debe considerar que las correlaciones entre MO-REE en bosque nativo si bien son bajas, son positivas y podría indicar algún tipo de correlación entre la MO y las REE, posiblemente influenciada por asociaciones órgano-metálicas, que en general tienen un mayor tiempo de residencia en los suelos, estas correlaciones positivas se dan principalmente en las MREE, donde en estudios como el de Han y otros (2017), se muestra una tendencia preferencial en la formación de complejos entre las MREE y la materia orgánica natural.

6.2 Comportamiento y distribución de las REE

6.2.1 Variaciones entre sitios con la misma cobertura

Dentro de los sitios que presentan un mismo tipo de cobertura no existen grandes diferencias entre sí, sin embargo, se pueden reconocer comportamientos diferentes al menos para los sitios ubicados bajo bosque nativo (BN). Por otra parte, para los sitios que se encuentran bajo plantaciones (PL) existen importantes diferencias en los contenidos de REE.

La principal diferencia en los sitios de bosque nativo se da entre el sitio BN1 y el sitio BN2, ya que, el primero presenta una disminución en la concentración de REE desde el horizonte Oi hasta el horizonte B5, mientras que el segundo presenta un aumento en las concentraciones hacia profundidad desde el horizonte A al horizonte B6, esto podría deberse a que el sitio BN1 es el sitio que presenta una menor disminución de materia orgánica en profundidad y

podría ser que las REE se retengan en los horizontes superficiales formando compuestos organometálicos, por otro lado el sitio BN2 presenta más fragmentos rocosos que BN1 o al menos de tamaños superiores, esto facilitaría el flujo de fluidos y por ende la lixiviación hacia horizontes más profundos. En general, no existen grandes variaciones entre los diferentes horizontes de suelo, aunque se presentan algunos empobrecidos como el caso del horizonte B6 en el sitio BN4, que puede deberse a la cantidad de fragmentos grandes que posee ese horizonte, lo que de forma similar al caso de BN2 podría permitir un mayor flujo de agua y una mayor lixiviación en el horizonte.

Al comparar las concentraciones de los sitios de bosque nativo, el sitio con mayores contenidos de REE es el sitio BN2, seguido de BN1 y finalmente el sitio BN4, y además, todos los sitios presentan concentraciones ponderadas mayores al de la roca parental (Figura 5.3D), sin embargo, al comparar sus τ_{ij} el sitio más enriquecido de los tres es el sitio BN4; sitio con las menores concentraciones de REE de BN, esto se debe a que para calcular el τ_{ij} se utiliza el elemento inmóvil Ti, y es aquí donde las concentraciones de este elemento en BN4 son menores que para los otros sitios, dando así valores τ_{ij} más altos. Esta diferencia y dada la ubicación del sitio BN4 podría indicar la influencia de otra litología sobre este sitio.

Con respecto a los sitios de plantaciones, no presentan diferencias en su patrón de distribución al compararla con la roca parental, sino más bien solo en las concentraciones, donde el sitio PL4 ($\Sigma\text{REE}= 196\text{-}330$ ppm; $\bar{X}\Sigma\text{REE}= 296,97$ ppm) casi duplica al sitio PL1 ($\Sigma\text{REE}= 116\text{-}194$ ppm; $\bar{X}\Sigma\text{REE}= 158,06$ ppm). Además, si analizamos los τ_{ij} , el sitio PL4 se encuentra muy enriquecido, a diferencia del sitio PL1 que es el más empobrecido del estudio. Estas diferencias de concentración y τ_{ij} , pueden estar marcadas por diferencias topográficas en la ubicación de los sitios, ya que el sitio PL1 está ubicado en una zona de cumbre y de erosión, mientras que el sitio PL4 se ubica en una zona geomorfológicamente de acumulación de material.

Si analizamos las concentraciones de los elementos en profundidad, notamos que en PL1 entre los 66-124 cm (horizontes B2-B3) existe una disminución en los contenidos de las tierras raras. El sitio PL4, presenta un enriquecimiento en profundidad de sus elementos con un aumento marcado en sus primeros 30 cm (horizontes A) que se vuelve paulatino desde los

horizontes B. Finalmente para el caso de PL3 este presenta un aumento de concentración en sus primeros 30 cm (horizonte O, A y B1) y una disminución a partir del horizonte B2 al B9.

6.2.2 Variaciones entre sitios con diferente cobertura

Los suelos bajo plantaciones (PL) presentan notables variaciones en los contenidos de tierras raras en comparación con los suelos de bosque nativo (BN). Por ejemplo, el coeficiente de transferencia de masa (τ_{ij}) revela diferencias significativas en los niveles de enriquecimiento y empobrecimiento entre ambos tipos de suelos. Los sitios de BN presentan menos empobrecimientos que PL y menores en valor, pero con respecto a los elementos enriquecidos estos se presentan en mayor proporción ($\tau_{ij} > 0,5$) en PL, además de presentar el mayor enriquecimiento (1,47 Lu en PL4-7), el cual presenta un coeficiente considerablemente más alto comparado con el mayor coeficiente registrado en BN (0,96 Lu en BN4-6).

En términos de materia orgánica (MO), se destacan diferencias numéricas significativas, donde PL4 exhibe un contenido máximo del 5.14%. Los seis sitios presentan el mismo patrón en profundidad donde ocurre una disminución drástica de los contenidos de MO. Tal y como se nombró en la sección 6.1, la MO puede ser un factor que controle los contenidos de REE, esto no queda muy claro en este estudio, ya que las matrices de correlación no marcan una clara relación entre las REE-MO, aunque para los sitios de BN hay correlaciones positivas pero bajas, para PL es lo contrario casi todas las correlaciones son negativas, pero tampoco son altas como para destacar una correlación negativa entre ambos factores.

Con respecto a la textura de los suelos en ambos sitios se encontraron correlaciones negativas con las arcillas, pero correlaciones muy positivas con la fracción arena, sobre todo en los sitios de plantaciones, esto es interesante, ya que por lo general las REE se encuentran relacionadas a arcillas, las cuales las unen a ellas mediante adsorción (Laveauf y Cornu, 2009). En este caso, como la correlación es con la fracción arena estaría indicando que las tierras raras están relacionadas principalmente al material parental.

En todos los sitios existe un enriquecimiento del Ce hacia profundidad, esto tiene sentido ya que tiene una mayor capacidad de movilizarse hacia los niveles inferiores (Hu y otros, 2006 en Castillo, 2018).

6.3 Influencia del cambio de uso de suelo en la geoquímica de las REE

Diversos autores (Chen y otros, 2016; Crovo y otros, 2021; Cifuentes-Croquevielle y otros, 2020) registraron reducciones en los nutrientes disponibles en suelos que han remplazado su cubierta vegetal de bosque nativo por plantaciones exóticas, donde principalmente se registra una disminución en los contenidos de carbono (C) y de materia orgánica en los suelos. Esto último no se ve registrado en todos los sitios de este estudio, ya que el sitio PL4, correspondiente a un sitio de plantación es el sitio que presenta el mayor contenido de C y de MO en su horizonte superficial con 8,86% y 5,14% respectivamente. Sin embargo, los sitios BN2 y BN1 en profundidad tienen mayor contenido de MO que el resto de los sitios. En este sentido el sitio BN4 sería el que presenta un comportamiento diferente en los sitios de nativo, esto puede ocurrir, dada la ubicación más lejana que posee este último sitio, además de estar ubicado en una zona de alta erosión.

La hipótesis inicial de este estudio planteaba verificar la pérdida de materia orgánica producto del cambio de uso de suelo de bosque nativo a plantaciones de pino y si esta provocaría una disminución en los contenidos de REE, sin embargo, los resultados no respaldan esta hipótesis de forma concluyente, ya que, por una parte la correlación de MO-REE es levemente más significativa para los datos de BN que para los de PL, no obstante, el sitio con mayores contenidos de MO, pertenece los suelo cubiertos de plantaciones (PL4) y si se consideran los contenidos de MO por uso de suelo y no por sitio, el de BN es levemente mayor, al igual que al comparar los promedios ponderados de REE por uso de suelo BN ($\bar{X}\Sigma\text{REE} = 231,56$ ppm) con PL ($\bar{X}\Sigma\text{REE} = 225,96$); la diferencia es poco significativa, y menos teniendo en consideración que PL4 es el sitio que presenta las concentraciones de REE más alta, este resultado plantearía, sin embargo, la idea de que los suelos con mayor contenido de materia orgánica serían capaces de retener mayor proporción de REE independiente de si la cobertura es de bosque nativo o de plantación de pino.

Además, se debe tener en consideración que el cambio de uso de suelo no solo afecta a los contenidos de materia orgánica, sino que, también puede afectar el pH de los suelos, tal y como lo plantea Schlatter y Otero (1995), donde muestran que existe una tendencia a la acidificación en profundidad en los perfiles de suelo bajo plantaciones forestales comparados con bosque nativo. Lo anterior se cumple al comparar los sitios de estudio BN1 y PL1, esto

determinado en el estudio de Castillo y otros (*In Prep*), donde reconoce una disminución del pH en profundidad en el sitio bajo plantación.

Otro factor que afecta el cambio de uso de suelo puede ser la mineralogía presente en los suelos, considerando que estos presentan el mismo material parental, estos presentan diferentes tipos y contenidos de arcillas en los sitios, lo anterior también fue estudiado por Castillo y otros (*In Prep*) y en donde se presenta que el sitio bajo bosque nativo (BN1) presenta mayores contenidos de arcilla que PL1, además existe una notoria disminución de arcillas como vermiculita y HIV que otras arcillas como caolinita e illita (Weil y Brady, 2017), esto es importante ya que como se nombró antes en la discusión, son las arcillas las que tienen la capacidad de adsorber a las REE y por ende retenerlas dentro del perfil de suelo y específicamente la vermiculita y HIV tienen una mayor capacidad de intercambio catiónico.

Lo planteado por Aburto y otros (2021) también podría afectar los contenidos y distribución de las REE, ya que ellos plantean que los suelos formados bajo plantaciones tienen una erosión significativamente mayor que los formados bajo bosque nativo, esto último podría ser un factor de pérdida o de acumulación en algunos sectores de estos elementos. Tal y como podría ser el caso de la diferencia de concentraciones entre el sitio PL1 y PL4 ya nombrada anteriormente, donde se podría atribuir las bajas concentraciones de PL1 a una zona de erosión y las altas concentraciones de PL4 a una zona de acumulación.

Considerando los resultados obtenidos, no queda en claro que el cambio de uso de suelo afecte directamente la geoquímica de las REE, sino que este genera un conjunto de variaciones en las propiedades biofísicoquímicas del suelo (pH, textura, materia orgánica, mineralogía, meteorización) que son las que en conjunto con otros factores (clima, topografía, material parental) regulan la distribución y comportamiento de las tierras raras. Específicamente, entre los sitios bajo bosque nativo y los de plantaciones, no existen diferenciadas marcadas que permitan hacer una separación clara entre ambos grupos, si no que los sitios de bosque nativo se comportan de manera similar en lo que a concentraciones respecta, mientras que los sitios de plantaciones están marcados por la gran variabilidad en el contenido de REE que estos presentan, considerando la cercanía entre estos sitios y que el material parental es el mismo, se puede atribuir las diferencias a la morfología del área de

estudio o a la mayor presencia de vegetación nativa en las cercanías del sitio PL4, que podría influir en los contenidos de materia orgánica y de las tierras raras en ese sitio en específico.

6.4 Recomendaciones para mejorar la calidad del estudio

Pese a que se intentó incluir una gran cantidad de factores, para analizar la distribución y comportamiento de las tierras raras bajo ambos uso de suelos, existen factores que no se pudieron incluir en este estudio por diferentes motivos, dentro de estos se encuentra la obtención de pH de los suelos y la completa caracterización textural de los mismos, ya que solo se incluyen 26 muestras de un total 50.

El pH es un factor que controla la movilización de las REE (Aubert y otros, 2000). Además, bajo ciertas circunstancias (pH neutro) este puede facilitar la formación de complejos entre REE y materia orgánica (Han y Xu, 2021). Por otro lado, se podría estudiar la formación de estos complejos y si influyen en los contenidos de REE en los suelos estudiados, esto, junto a la obtención de los contenidos de arcillas y óxidos de Fe podría ayudar a entender de mejor manera la forma de acumulación de REE en los suelos ya que estos elementos son adsorbidos por los materiales mencionados anteriormente (Han y Xu, 2021; Hu y otros 2006). Además, se podría analizar el tipo de materia orgánica presente en los sitios, ya que existen diferentes tipos de materia orgánica, habiendo algunas que se asocian a metales (como REE) y otras que son más fáciles de degradar.

Para mejorar la calidad de los datos de coeficiente de transferencia de masa se podría trabajar con los contenidos de REE presentes en las rocas, del área de estudio para que sean valores más representativos y revelen de forma más precisa las pérdidas y ganancias de estos elementos. Ya que, si bien en los diagramas multielementos (Figuras 5.3 y 5.4) se observa que solo la muestra PL1 se encuentra con concentraciones menores que la muestra de roca promedio calculada, en lo que respecta a los coeficientes de transferencia de masa, la gran mayoría de elementos se encuentra empobrecido con respecto a la roca parental, lo anterior podría explicarse con que los contenidos de Ti son muy diferentes entre las muestras de suelo y el calculado para la roca, incluso llegando a duplicar los suelos a la roca en algunas muestras. Lo anterior, podría generar una distorsión en la lógica que hay detrás del uso del coeficiente de transferencia de masa, ya que se espera que ambos medios (roca y suelo)

tengan contenidos similares del elemento inmóvil, en este caso de Ti (Castillo, 2018). Por lo tanto, este parámetro podría llegar a cambiar significativamente al ser calculado con muestras tomadas in situ de terreno.

En específico, se podrían estudiar a mayor detalle los sitios de plantaciones para dilucidar de mejor manera el porqué de la variabilidad de sus contenidos de REE y Mo. Además, para finalizar se podría analizar los contenidos de REE en las muestras de aguas de poro obtenidas a mediados de 2023, para ver si en este ámbito existen diferencias entre ambos usos de suelo, y así dilucidar de mejor manera los verdaderos efectos que tiene el cambio de uso de suelo de bosque nativo a plantaciones de *Pinus sp.* en la geoquímica de las REE del Parque Nacional Nonguén.

7 CONCLUSIÓN

En esta investigación, se estudió como afecta el reemplazo parcial del bosque nativo en el Parque Nacional Nonguén, por plantaciones de *Pinus sp.*, la geoquímica del grupo de las tierras raras, en específico sus concentraciones y comportamiento en el perfil de suelo de los seis sitios de estudio, además de las relaciones de estas concentraciones con otros parámetros como la materia orgánica (MO), la textura de los suelos o el material parental.

Los análisis de resultados de la geoquímica de las REE en ambos uso de suelo, muestran algunas diferencias significativas entre sitios con la misma cobertura, como lo son el comportamiento diferentes que presentan los sitios BN1 y BN2 en profundidad, a diferencia de los sitios bajo plantaciones que en profundidad se comportan similar, o en lo que respecta a las concentraciones de REE y contenidos de MO donde los sitios de bosque nativo son similares, mientras que los de plantaciones presentan una gran variabilidad en los contenidos. Esta gran variabilidad podría estar siendo afectada por pequeñas variaciones topográficas y por factores como la erosión y depositación de material. En particular, la hipótesis planteada de que la pérdida de materia orgánica producto del cambio de uso de suelo de bosque nativo a plantaciones de pino provocaría una disminución del contenido de REE en los suelos, no es concluyente, ya que la pérdida de MO no fue consistente en todos los sitios de plantaciones, y a su vez esta disminución del contenido de REE producto de la pérdida de material orgánico tampoco se ve reflejada, ya que el sitio con mayores contenidos de MO y de REE es un sitio perteneciente a plantaciones de *Pinus sp.*, lo cual si podría indicar que independiente de la cobertura vegetal, el mayor contenido de MO en los suelos podría influir en una mayor retención de tierras raras. Sin embargo, las mejores correlaciones MO-REE se presentaron en los sitios bajo bosque nativo.

Algo a destacar es la alta correlación entre la fracción arena y los contenidos de REE sobre todo en los sitios de plantaciones indicando una gran influencia en los contenidos de REE proveniente del material parental, lo que se verifica al comparar sus patrones de distribución.

Futuros estudios podrían centrarse en la dinámica temporal de los procesos geoquímicos y considerar la influencia de factores climáticos en la movilidad de REE y MO, además de complementar con parámetros fisicoquímicos del suelo y estudios más específicos de MO.

8 REFERENCIAS

- Aburto, F., Cartes, E., Mardones, O., & Rubilar, R. (2021). Hillslope soil erosion and mobility in pine plantations and native deciduous forest in the coastal range of south-Central Chile. *Land Degradation and Development*, 32(1), 453–466.
- Aguilar, M. (2024). Comparación de la dinámica del Carbono en bosque nativo versus plantaciones de *Pinus* sp. en el Parque Nacional Nonguén, Región del Biobío, Chile. [Tesis de Pregrado]. Universidad de Concepción, Chile.
- Aguirre, L., Hervé, F., & Godoy, E. (1972). Distribution of metamorphic facies in Chile: an outline. *Krystallinikum*, 9(1), 7–19.
- Alarcón, A. (2019). Caracterización óptica y composicional del concentrado de minerales de uranio, torio y tierras raras en las pegmatitas de Poñen y Parque Coyanmahuida. [Tesis de Pregrado]. Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- Alloway, B. (1995). *Heavy Metals in Soils*, 2nd Edition; Blackie Academic & Professional: UK.
- Aubert, D., Stille, P. and Probst, A. (2000). REE fractionation during granite weathering and removal by waters and suspended loads: Sr and Nd isotopic evidence. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(3), 387-406.
- Bernard, I. (2023). Caracterización hidroquímica e isotópica del estero Nonguén y su relación con los servicios ecosistémicos de provisión y regulación hídrica del Parque Nacional Nonguén (36°48'58"-36°56'13" S y 72°56'40"-73°01'42" W). Región del Biobío, Chile. [Tesis de Pregrado]. Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- Berrocal, C. (2021). Criterio geológicos usados para el reconocimiento de un depósito de tierras raras en regolito, Río Lía, Región del Biobío, Chile. [Tesis de Pregrado]. Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- Börgel, R. (1983). *Geografía de Chile, Geomorfología*. Instituto Geográfico Militar: 182 pp. Santiago.
- Braun, J., Pagel, M., Herbillon, A. and Rosin, C. (1993). Mobilization and redistribution of REEs and thorium in a syntetic lateritic profile: A mass balance study. *Geochimica et Cosmochimica*, 57, 4419-4434.
- Brimhall, G. H., Dietrich, W.E. (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*, 51: 567–587.
- Bouyoucus, G.J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agron. J*, 54, 464-465.
- Bustos, N., Marquardt, C., Belmar, A. and Cordeiro, P. (2022). Regolith-hosted rare earth exploration in the Chilean Coastal Range of the Central Andes. *Journal of Geochemical Exploration*, 234, 1-17.

- Castillo, P. (2019). Biogeoquímica del sistema roca-suelo-planta en cuatro viñas de Chile Central (33°-36°S): Influencias litogénicas, pedogenéticas y antrópicas. [Tesis de Doctorado]. Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Castillo, P., Aburto, F., Alborno, M. F., Crovo, O., Czimkzik, C. I., & Southard, R. (In prep.). Natural Forest conversion to Exotic Pine plantations induces soil 2 mineralogical changes – Implications for soil organic carbon stabilization. *Available at SSRN 4590864*.
- Cifuentes-Croquevielle, C., Stanton, D. and Armesto, J. (2020). Soil invertebrate diversity loss and functional changes in temperate forest soils replaced by exotic pine plantations. *Scientific Reports*. 10 (7762), 1-11.
- Chakmouradian, A. R. & Wall, F. (2012). Rare earth elements: minerals, mines, magnets (and more). *Elements*. 8 (5), 333-340.
- Chen, G., Yang, Y., Yang, Z., Xie, J., Guo, J., Gao, R., Yin, Y. and Robinson, D. (2016). Accelerated soil carbon turnover under tree plantations limits soil carbon storage. *Scientific Reports*. 6 (19693), 1-7.
- CONAF. (2019). Plan de Manejo Reserva Nonguén. Santiago, Chile: Unidad de gestión Patrimonio Silvestre, Corporación Nacional Forestal.
- Contreras, A. (2022). Efectos de coberturas y usos de suelo en la meteorización a partir del estudio de elementos traza y $\delta^{7}\text{Li}$ en sedimentos en suspensión y aguas en la Cuenca de Nonguén, Concepción, Región del Biobío. [Tesis de Pregrado]. Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- 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*. 2(2): 33-46.
- Creixell, C. (2001). Petrología y Geotermobarometría de las Rocas Intrusivas de la Cordillera de la Costa entre los 36°30' y 38°00'S. [Tesis de Pregrado]. Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- Crovo, O., Aburto, F., Alborno, M. and Southard, R. (2021). Soil type modulates the response of C, N, P stocks and stoichiometry after native forest substitution by exotic plantations. *Catena*, 197, 1-13.
- Di Gregorio, A and Jansen, L. (1998). Land Cover Classification System (LCCS): Classification Concepts and User Manual. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*, Roma.
- Echeverría, C., Gatica, P. and Fuentes, R. (2013). Habitat Edge Contrast as an Indicator to Prioritize Sites for Ecological Restoration at the Landscape Scale. *Natureza & Conservação*, 11(2), 170-175.
- EULA. (2002). Estudio básico zonificación del fundo Nonguén. Concepción.

- Elkina, V. and Kurushkin, M. (2020). Promethium: To strive, to seek, to find and not to yield. *Frontiers in Chemistry*, 8, 1-8.
- 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). Concepción.
- Gupta, C. K. and Krishnamurthy, N. (2005). Extractive metallurgy of rare earths. CRC Press, 508 pp.
- Han, G., Li, F. and Tang Y. (2017). Organic Matter Impact on Distribution of Rare Earth Elements in Soil Under Different Land Uses. *Clean–Soil, Air, Water*, 45 (2), 1-9.
- Han, R. and Xu, Z. (2021). Geochemical Behaviors of Rare Earth Elements (REEs) in Karst Soils under Different Land-Use Types: A Case in Yinjiang Karst Catchment, Southwest China. *Environ. Res. Public Health*, 18 (502). 1- 18.
- 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*, 1-51.
- 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. *Geodynamics Series*, 18, 97-114.
- Hervé, F., Munizaga, F., Parada, M. A., Brook, M., Pankhurst, R. J., Snelling, N. J., & Drake, R. (1988). Granitoids of the Coast Range of central Chile: Geochronology and geologic setting. *Journal of South American Earth Sciences*, 1(2), 185–194.
- Hu, Z., Haneklaus, S., Sparovek, G. and Schnug, E. (2006). Rare Earth Elements in Soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 37(9-10), 1381-1420.
- Lambin, E., Turner, B., Geist, H., Agbola, S. and Angelsen A. (2001). The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions*. 11, 261-269.
- Lambin E.F., Geist H., Rindfuss R.R. (2006) Introduction: Local Processes with Global Impacts. In: Lambin E.F., Geist H. (eds) Land-Use and Land-Cover Change. Global Change - The IGBP Series. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Laveuf, C. and Cornu, S. (2009). A review on the potentiality of Rare Earth Elements to trace pedogenetic processes. *Geoderma*, 154, 1-12.
- López, V., Balderas, M., Chávez, M., Pérez, J. and Gutiérrez, J. (2015). Cambio de uso de suelo e implicaciones socioeconómicas en un área mazahua del altiplano mexicano. *Ciencia Ergo Sum*. 22(2), 136-144.
- Lucassen, F., Trumbull, R., Franz, G., Creixell, C., Vásquez, P., Romer, R. L., & Figueroa, O. (2004). Distinguishing crustal recycling and juvenile additions at active continental margins: The Paleozoic to recent compositional evolution of the Chilean Pacific margin (36-41°S). *Journal of South American Earth Sciences*, 17(2), 103–119.

- Martin, M., Kato, T., Rodriguez, C., Godoy, E., Duhart, P., McDonough, M., Campos, A. (1999). Evolution of the late Paleozoic accretionary complex and overlying forearc-magmatic arc, south central Chile (38°-41°S): constraints for the tectonic setting along the southwestern margin of Gondwana. *Tectonics*, 18(4), 582–605.
- Mihajlovic, J., Bauriegel, A., Stärk, H.J., Roßkopf, N., Zeitz, J., Milbert, G. and Rinklebe, J. (2019). Rare earth elements in soil profiles of various ecosystems across Germany. *Applied Geochemistry*, 102, 197-217.
- Navarrete, C. (2023). Influencia del cambio de uso de suelo en la geoquímica de suelos en el Parque Nacional Nonguén, Región del Biobío, Chile. [Tesis de Pregrado]. Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- Peng, A. and Wang, Z.J. (1996). Recent research progress on environmental chemistry of rare earth elements, introduction. In *Proceedings of the First Sino-Dutch Workshop on the Environmental Behavior and Ecotoxicology of Rare Earth Elements*; Beijing, 125–131.
- Phillips, J. (2017). Soil Complexity and Pedogenesis. *Soil Science*, 182(4), 117-127.
- Quezada, J. (1996). Geología urbana y Ambiental de la Ciudad de Concepción. [Tesis de Pregrado]. Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- Ramírez, P. (2004). Estudio geológico ambiental de la cuenca del estero Nonguén. [Tesis de Pregrado]. Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- Rodríguez, M., Araújo, C.W., Miranda, C., Agra, Y.J., Agra, Y.J., De Aguiar, A.M., Montero, A., Muñoz, O. and Estevez, J. (2018). Rare-earth-element geochemistry in soils developed in different geological settings of Cuba. *Catena*, 162, 317-324.
- Rollinson, R. (1993). Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. *Longman Scientific & Technical*: 352 pp. England.
- Sandoval, M., Dorner, J., Seguel O., Cuevas J. y Rivera D. (2012). Métodos de análisis físicos del suelo. *Departamento de Suelos y Recursos Naturales*. Chillán, Chile.
- Schlatter, J. y Otero, L. (1995). Efecto del *Pinus radiata* sobre las características químico-nutritivas del suelo mineral superficial. *Bosque*. 16(1) ,29-46.
- 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.
- Silva, C.M.C.A.C., Barbosa, R.S., Nascimento, C.W.A., Silva, Y.J.A.B. and Silva, Y.J.A.B. Geochemistry and spatial variability of rare earth elements in soils under different geological and climate patterns of the Brazilian Northeast. *Rev Bras Cienc Solo.*, 42, 1-17. <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20170342>
- Song, X. P., Hansen, M. C., Stehman, S. V., Potapov, P. V., Tyukavina, A., Vermote, E. F., Townshend, J. R., (2018). Global land change from 1982 to 2016. *Nature*, 560(7720), 639-643.

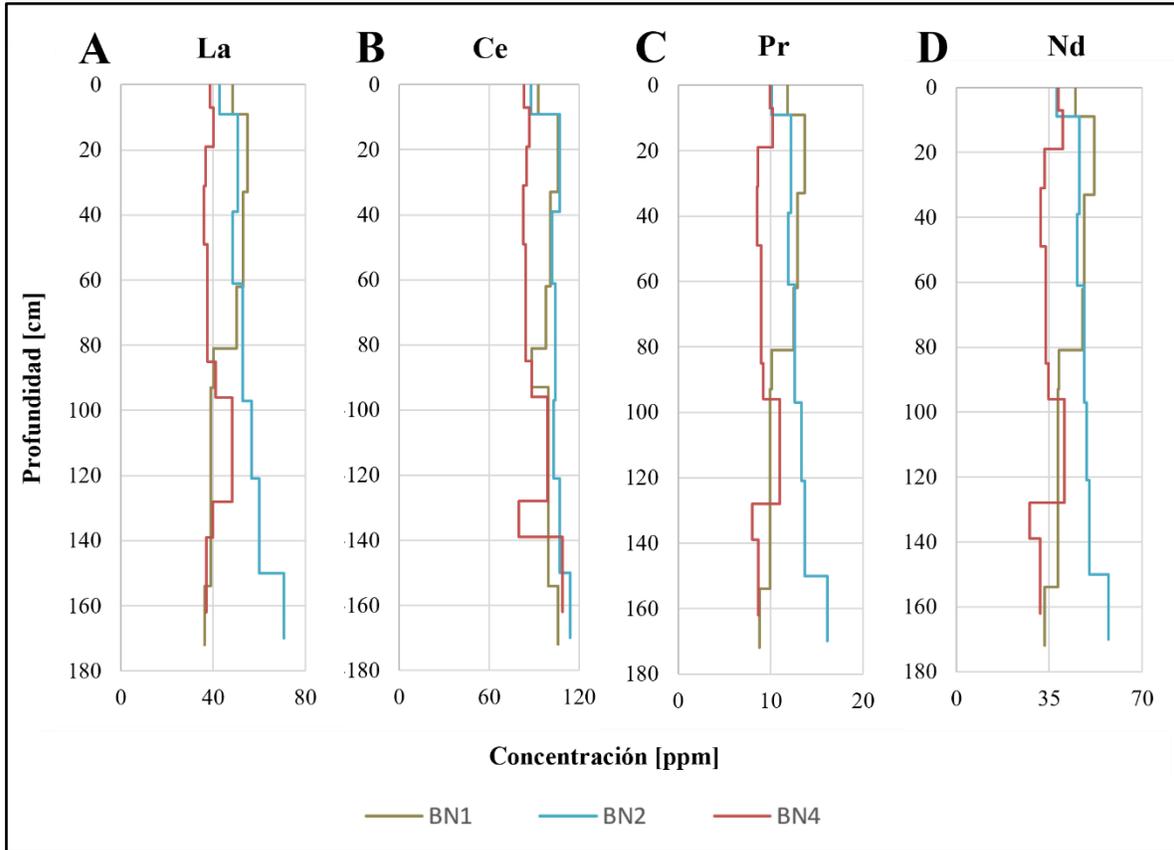
- Stanley, C., Lawie, D. (2007). Average relative error in geochemical determinations: Clarification, calculation, and a plea for consistency. *Exploration and Mining Geology*. 16(3-4), 267-275.
- Vela, G., López, J. y Rodríguez, M. (2012). Niveles de carbono orgánico total en el Suelo de Conservación del Distrito Federal, centro de México. *Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 77, 18-30.
- Vitousek, P., Mooney, H., Lubchenco, J. and Melillo, J. (1997). Human Domination of Earth's Ecosystems. *Science*. 277. 494-499.
- Weil, R. R., & Brady, N. C. (2016). Nature and Properties of Soils, The 15th Edition. *Pearson Education*.
- Wiche, O., Zertani, V., Hentschel, W., Achtziger, R. and Midula, P. (2017). Germanium and rare earth elements in topsoil and soil-grown plants on different land use types in the mining area of Freiberg (Germany). *Journal of Geochemical Exploration*, 175, 120-129.

9 ANEXOS

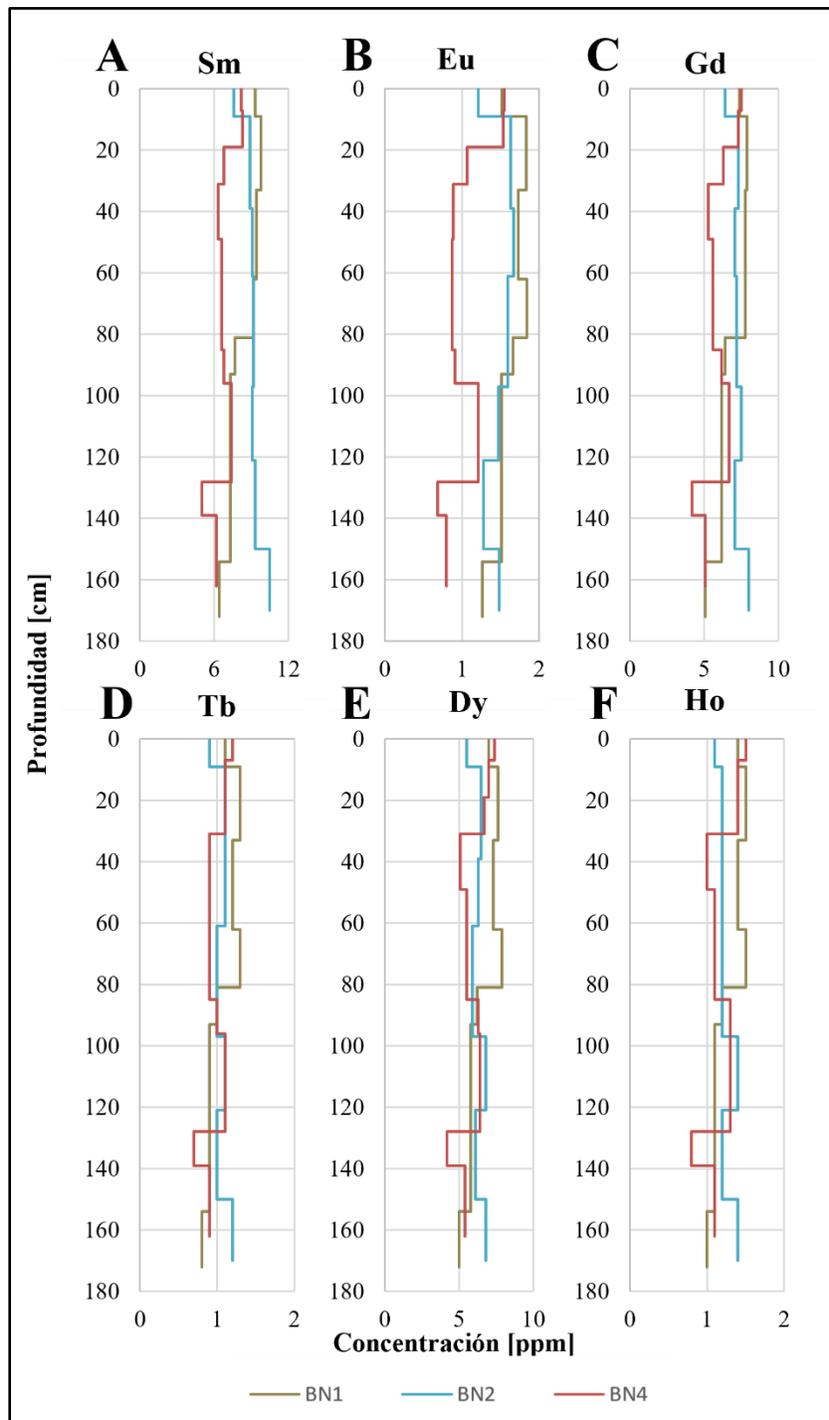
Anexo 1: tabla grupo de las tierras raras y sus características generales. Basado en Gupta y Krishnamurthy (2005).

Elementos	Símbolo	Número atómico	Peso atómico	Densidad (g/cm³)	Punto de fusión (°C)
Escandio	Sc	21	44,95	2,989	1541
Itrio	Y	39	88,80	4,469	1522
Lantano	La	57	138,90	6,146	918
Cerio	Cs	58	140,11	8,160	798
Praseodimio	Pr	59	140,90	6,773	931
Neodimio	Nd	60	144,24	7,008	1021
Prometio	Pm	61	154,00	7,264	1042
Samario	Sm	62	150,36	7,520	1074
Europio	Eu	63	151,96	5,244	822
Gadolinio	Gd	64	157,25	7,901	1313
Terbio	Tb	65	158,92	8,230	1356
Disproso	Dy	66	162,50	8,551	1412
Holmio	Ho	67	164,93	8,795	1474
Erbio	Er	68	167,26	9,066	1529
Tulio	Tm	69	168,93	9,321	1545
Iterbio	Yb	70	173,04	6,966	819
Lutecio	Lu	71	174,97	9,841	1663

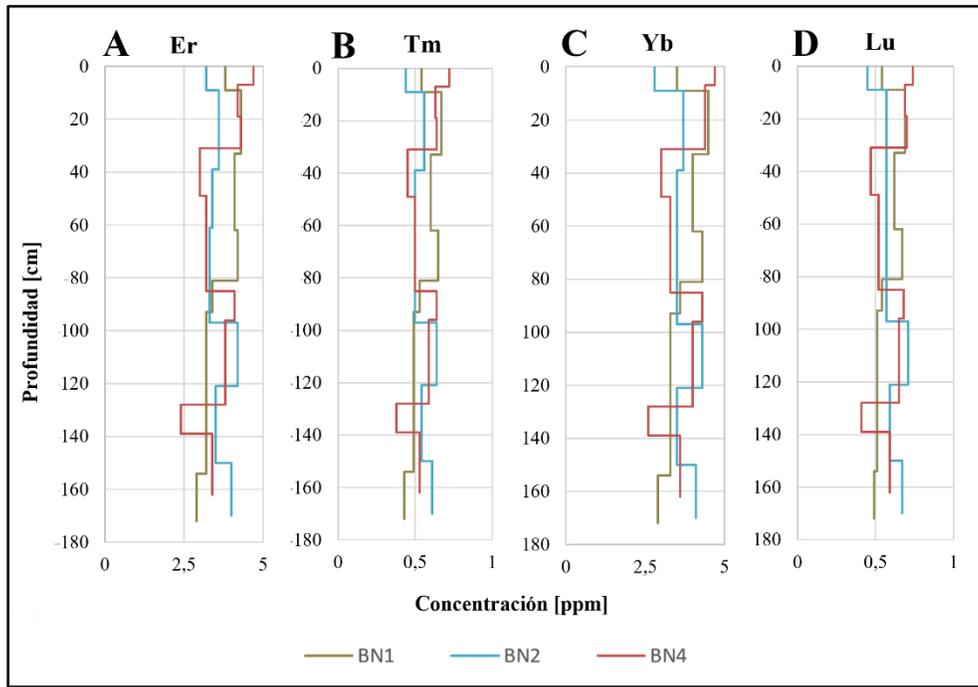
Anexo 2: contenidos de tierras raras livianas (LREE) en ppm a lo largo del perfil de suelo (profundidad) en cada sitio ubicado bajo bosque nativo. En (A) concentraciones de lantano (La). En (B) concentraciones de cerio (Ce). En (C) concentraciones de praseodimio (Pr) y en (D) concentraciones de neodimio (Nd).



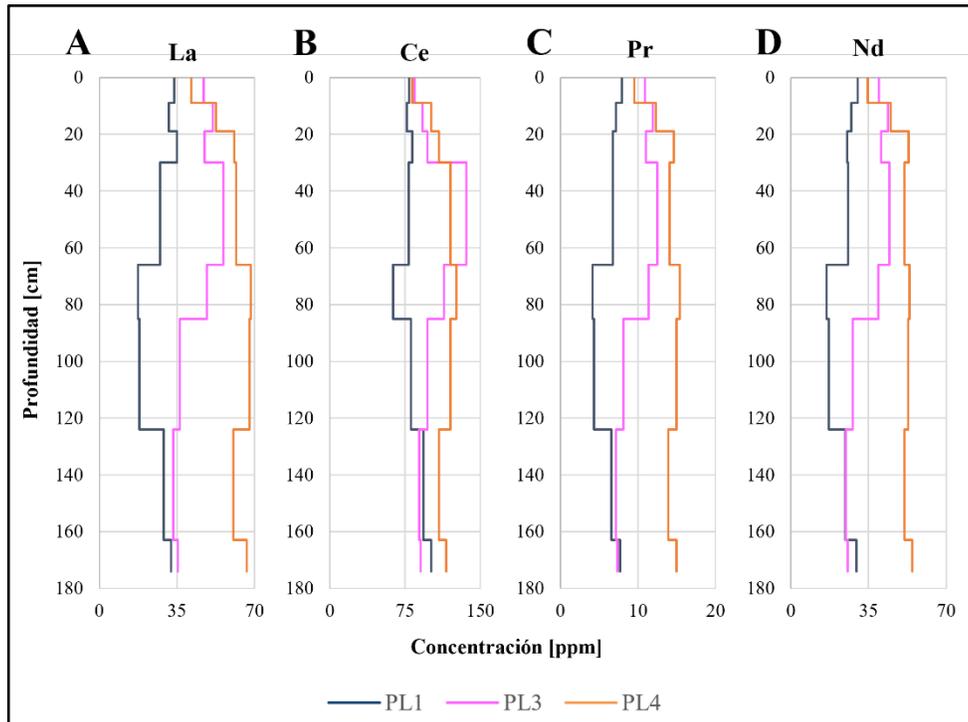
Anexo 3: contenidos de tierras raras medianas (MREE) en ppm a lo largo del perfil de suelo (profundidad) en cada sitio ubicado bajo uso de suelo de bosque nativo. En (A) concentraciones de samario (Sm). En (B) concentraciones de europio (Eu). En (C) concentraciones de gadolinio (Gd). En (D) concentraciones de terbio (Tb). En (E) concentraciones de disprosio (Dy). En (F) concentraciones de holmio (Ho).



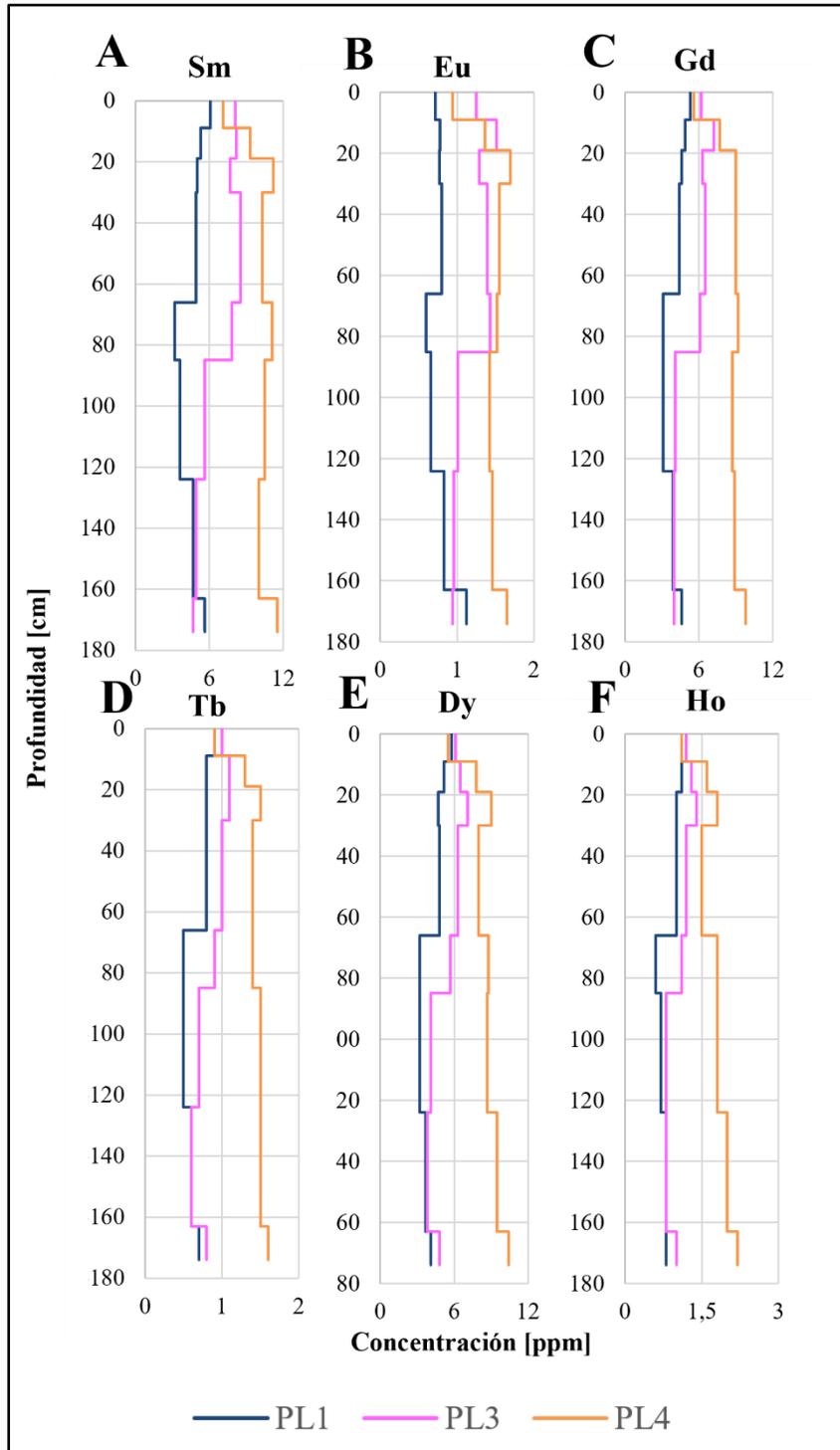
Anexo 5: contenidos de tierras raras pesadas (HREE) en ppm a lo largo del perfil de suelo (profundidad) en cada sitio ubicado bajo bosque nativo. En (A) concentraciones de erbio (Er). En (B) concentraciones de tulio (Tm). En (C) concentraciones de iterbio (Yb) y en (D) concentraciones de lutecio (Lu).



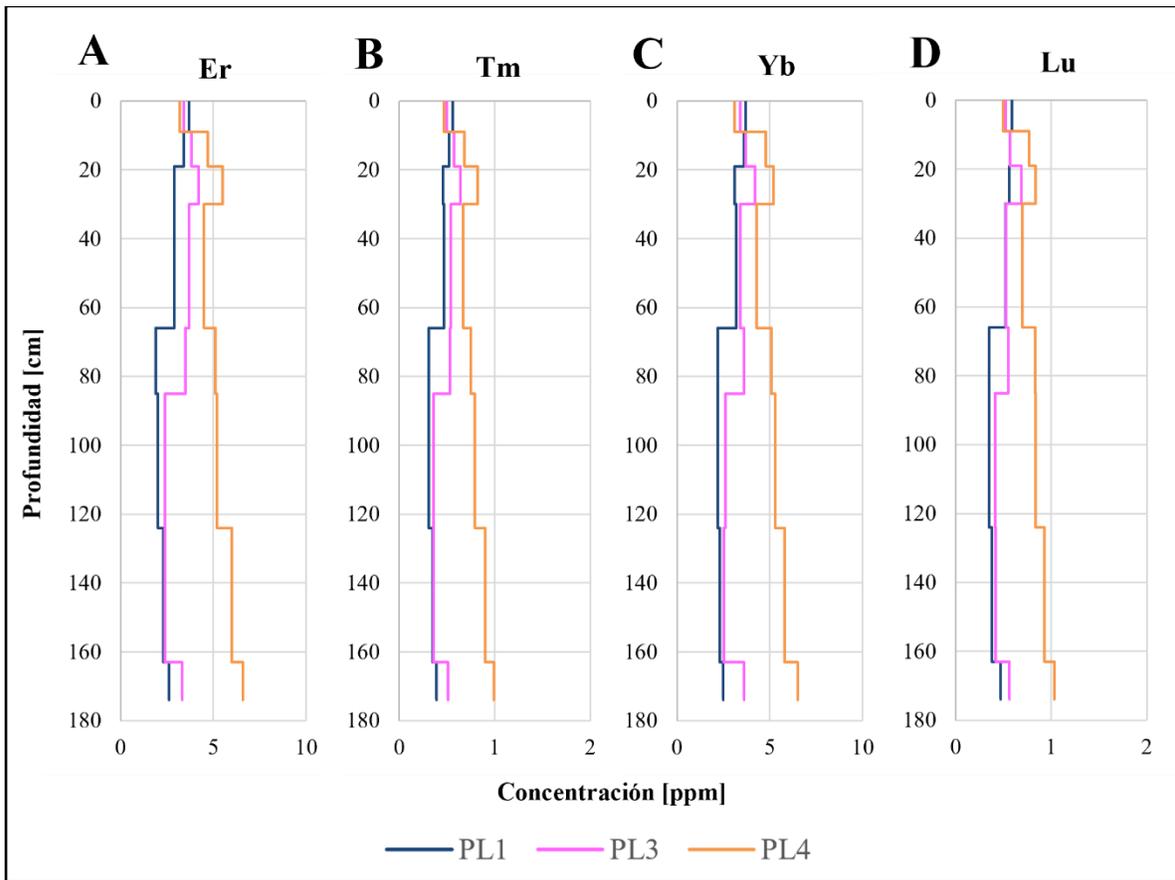
Anexo 4: contenidos de tierras raras livianas (LREE) en ppm a lo largo del perfil de suelo (profundidad) en cada sitio ubicado bajo uso de suelo de plantaciones de *Pinus sp.* En (A) concentraciones de lantano (La). En (B) concentraciones de cerio (Ce). En (C) concentraciones de praseodimio (Pr) y en (D) concentraciones de neodimio (Nd).



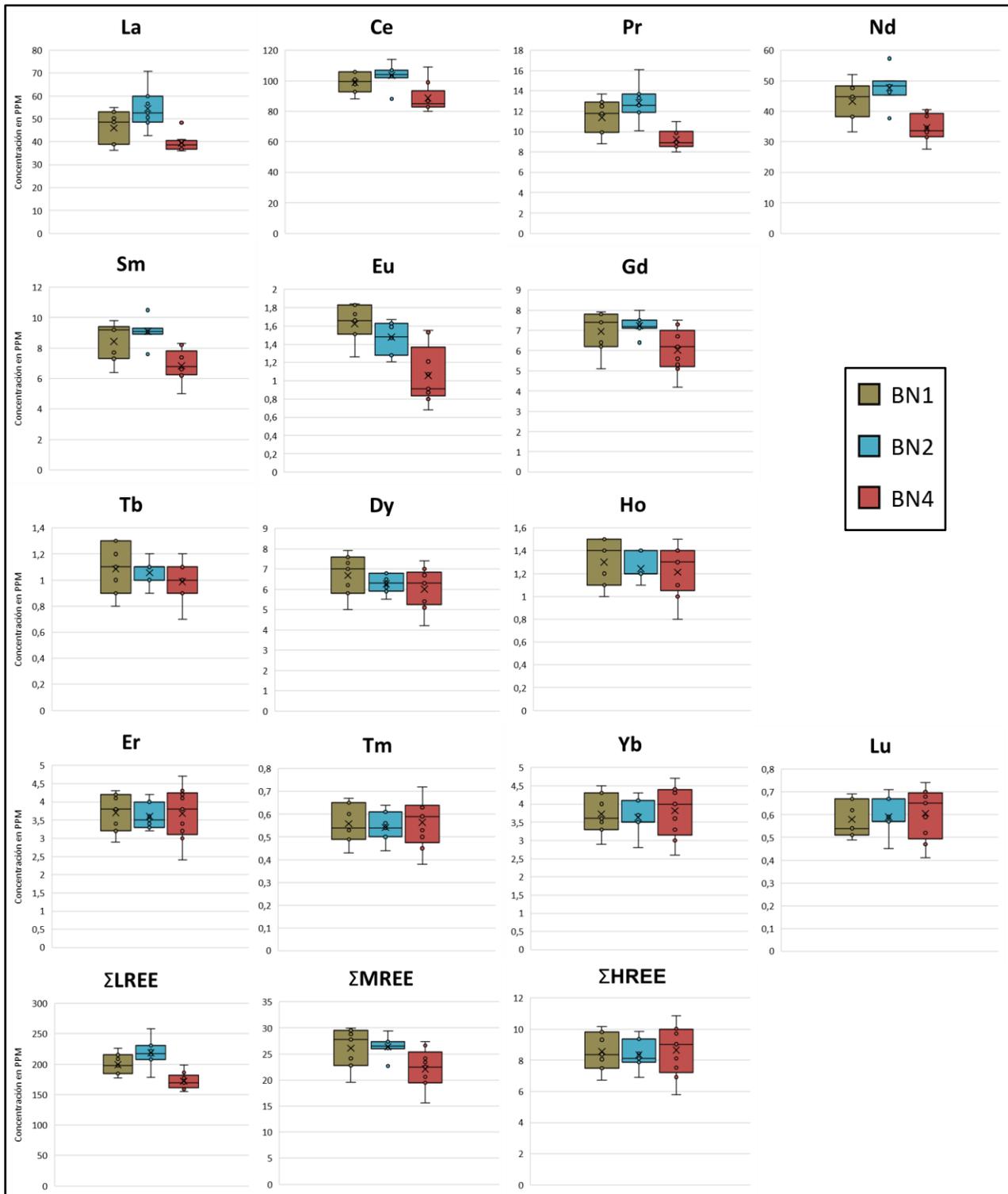
Anexo 6: contenidos de tierras raras medianas (MREE) en ppm a lo largo del perfil de suelo (profundidad) en cada sitio ubicado bajo uso de suelo de plantaciones de *Pinus sp.* En (A) concentraciones de samario (Sm). En (B) concentraciones de europio (Eu). En (C) concentraciones de gadolinio (Gd). En (D) concentraciones de



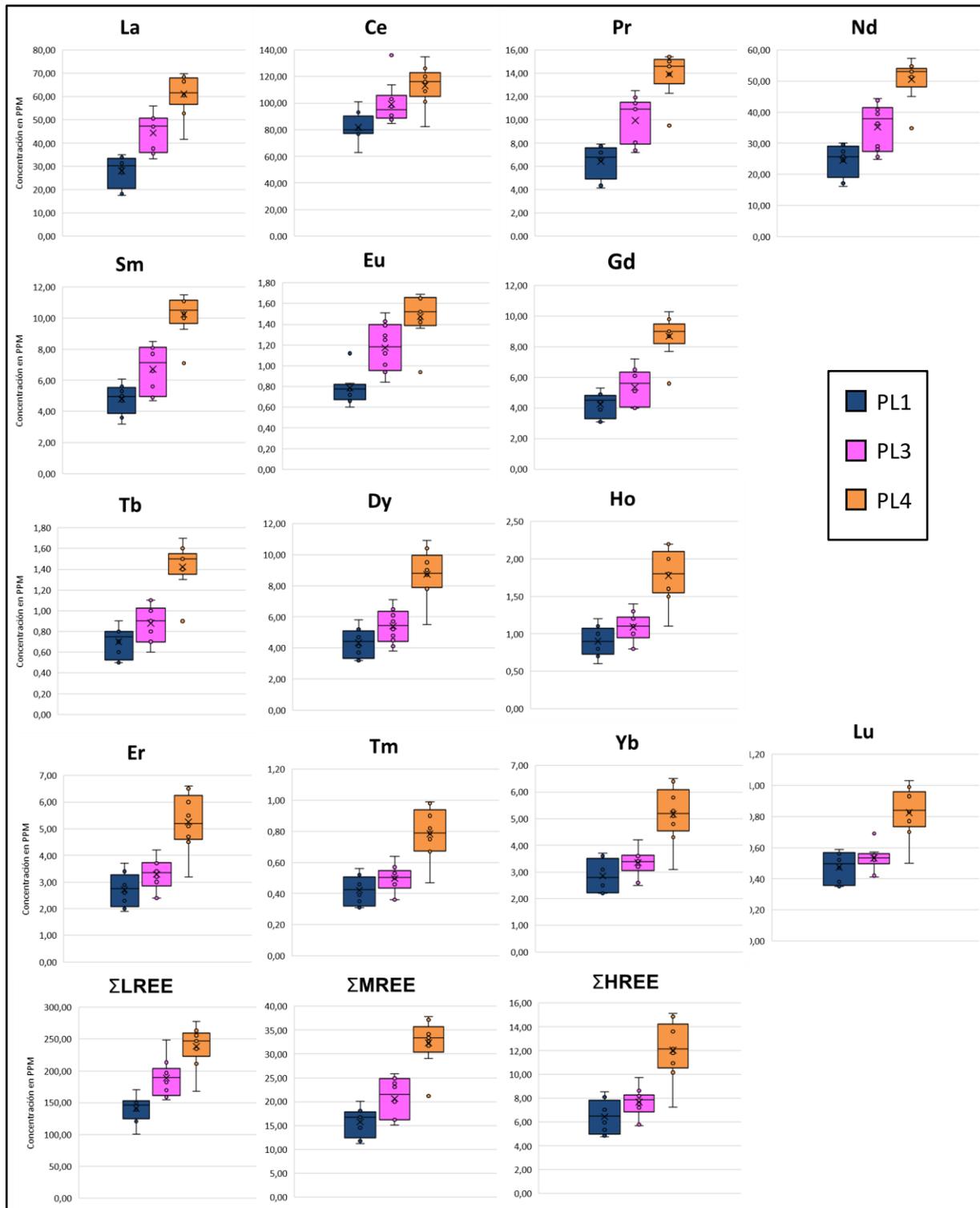
Anexo 7: contenidos de tierras raras pesadas (HREE) en ppm a lo largo del perfil de suelo (profundidad) en cada sitio ubicado bajo uso de suelo de plantaciones de *Pinus sp.* En (A) concentraciones de erbio (Er). En (B) concentraciones de tulio (Tm). En (C) concentraciones de iterbio (Yb) y en (D) concentraciones de lutecio (Lu).



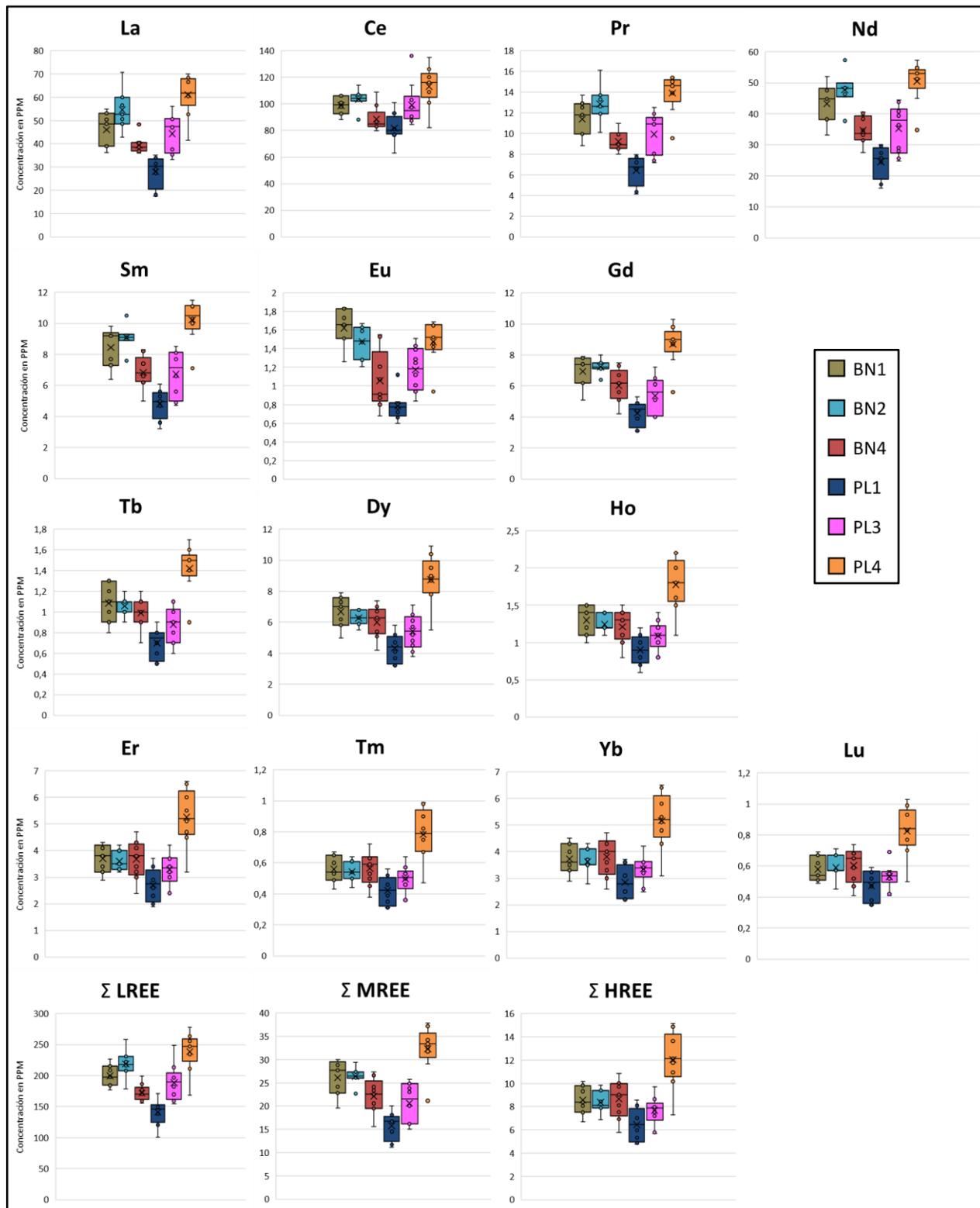
Anexo 8: diagramas boxplot para cada elemento y la Σ de LREE, MREE y HREE en sitios BN.



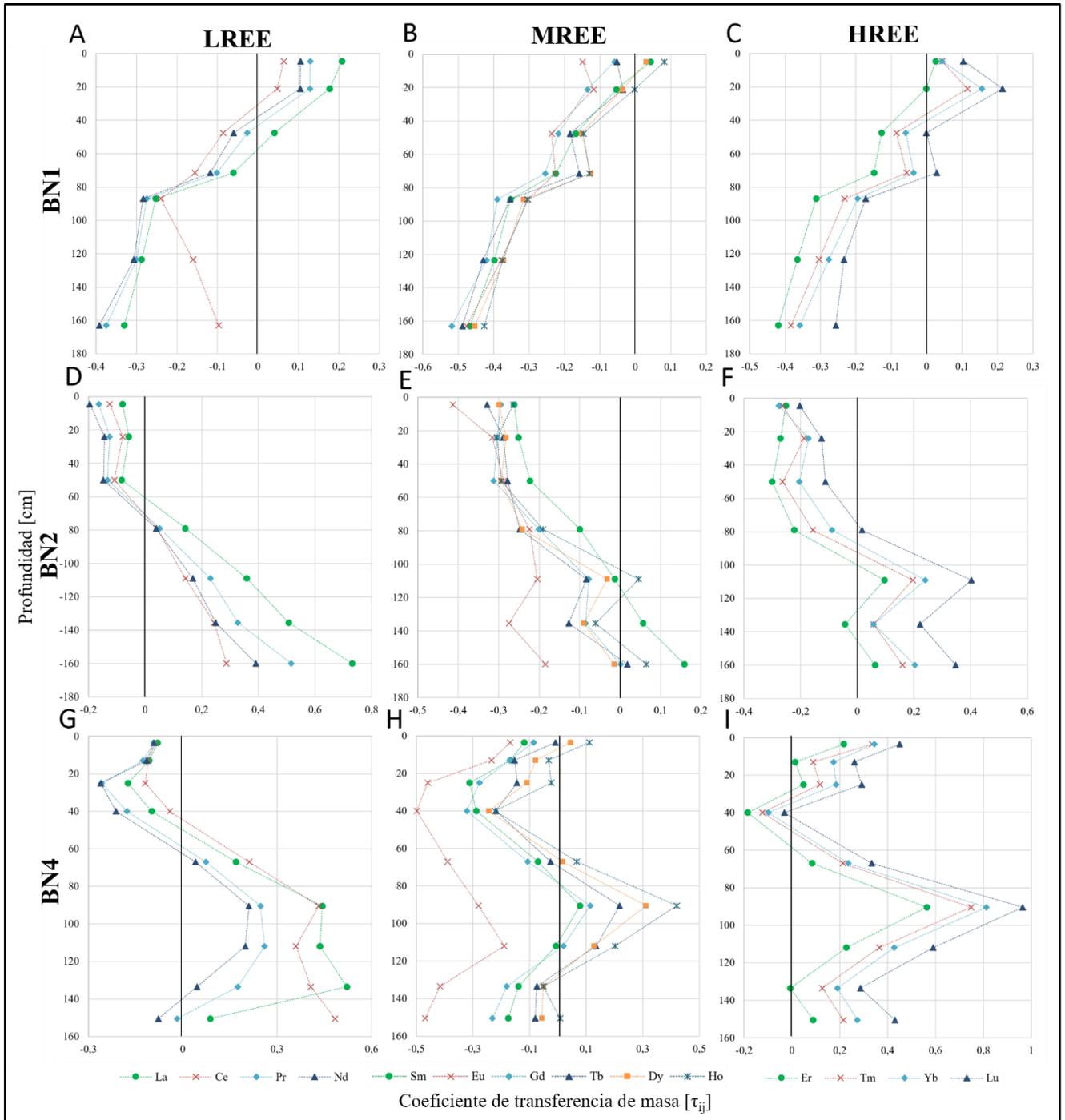
Anexo 9: diagramas boxplot para cada elemento y la Σ de LREE, MREE y HREE en sitios PL.



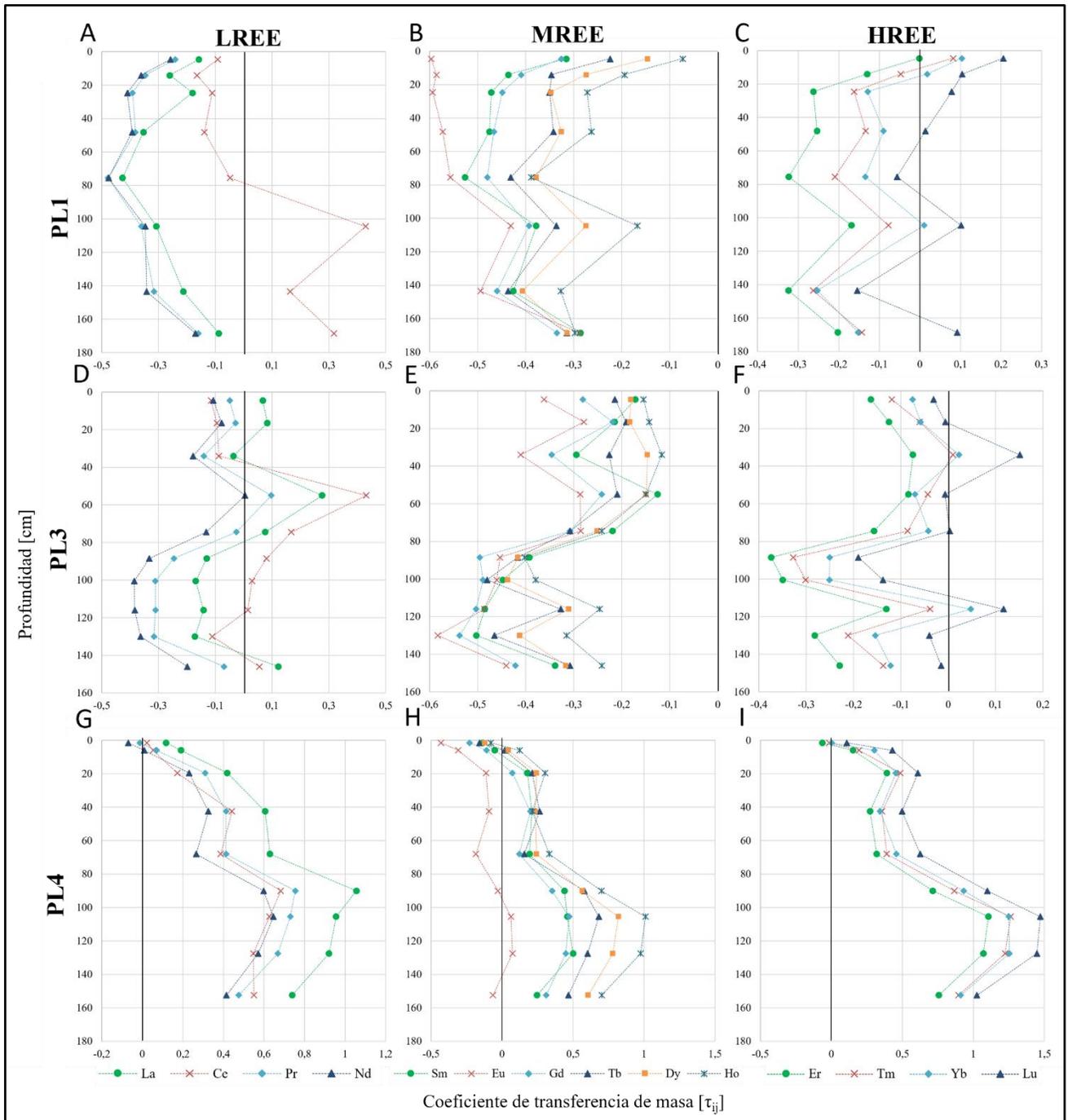
Anexo 10: diagramas boxplot para cada elemento y la Σ de LREE, MREE y HREE en sitios BN y PL juntos.



Anexo 11: gráficos profundidad v/s τ_{ij} para cada elemento en los sitios BN. A, B y C corresponden al sitio BN1, D, E y F corresponden al sitio BN2 y G, H e I corresponden al sitio BN4. En (A) τ_{ij} para las LREE. En (B) τ_{ij} para las MREE. En (C) τ_{ij} para las HREE. En (D) τ_{ij} para las LREE. En (E) τ_{ij} para las MREE. En τ_{ij} (F) para las HREE. En τ_{ij} (G) para las LREE. En τ_{ij} (H) para las MREE. En (I) τ_{ij} para las HREE.



Anexo 12: gráficos profundidad v/s τ_{ij} para cada elemento en los sitios PL. A, B y C corresponden al sitio PL1, D, E y F corresponden al sitio PL3 y G, H e I corresponden al sitio PL4. En (A) τ_{ij} para las LREE. En (B) τ_{ij} para las MREE. En (C) τ_{ij} para las HREE. En (D) τ_{ij} para las LREE. En (E) τ_{ij} para las MREE. En τ_{ij} (F) para las HREE. En τ_{ij} (G) para las LREE. En τ_{ij} (H) para las MREE. En (I) τ_{ij} para las HREE.



Anexo 13: tabla con los contenidos de C total, C inorgánico, C orgánico y materia orgánica para cada muestra.

Muestra	C total (%)	C inor (%)	C org (%)	MO (%)	Muestra	C total (%)	C inor (%)	C org (%)	MO (%)
BN1_1	6,932	0,081	6,851	3,97	PL1_1	4,76	0,005	4,759	2,76
BN1_2	2,188	0,072	2,116	1,23	PL1_2	2,18	0,005	2,178	1,26
BN1_3	1,228	0,071	1,158	0,67	PL1_3	1,37	0,005	1,367	0,79
BN1_4	1,124	0,054	1,070	0,62	PL1_4	0,53	0,025	0,503	0,29
BN1_5	0,994	0,045	0,949	0,55	PL1_5	0,23	0,023	0,206	0,12
BN1_6	0,844	0,046	0,798	0,46	PL1_6	0,17	0,013	0,158	0,09
BN1_7	0,713	0,041	0,672	0,39	PL1_7	0,13	0,024	0,105	0,06
BN2_1	7,245	0,038	7,207	4,18	PL1_8	0,11	0,024	0,089	0,05
BN2_2	1,823	0,030	1,793	1,04	PL3_1	2,66	0,091	2,567	1,49
BN2_3	0,913	0,029	0,885	0,51	PL3_2	2,12	0,100	2,018	1,17
BN2_4	0,515	0,019	0,496	0,29	PL3_3	1,13	0,115	1,010	0,59
BN2_5	0,283	0,019	0,264	0,15	PL3_4	0,57	0,146	0,423	0,25
BN2_6	0,201	0,016	0,185	0,11	PL3_5	0,52	0,145	0,371	0,22
BN2_7	0,125	0,016	0,109	0,06	PL3_6	0,41	0,144	0,270	0,16
BN4_1	4,340	0,005	4,335	2,51	PL3_7	0,37	0,150	0,222	0,13
BN4_2	2,093	0,005	2,088	1,21	PL3_8	0,39	0,194	0,199	0,12
BN4_3	0,981	0,005	0,976	0,57	PL3_9	0,42	0,200	0,220	0,13
BN4_4	0,488	0,005	0,483	0,28	PL3_10	0,46	0,251	0,213	0,12
BN4_5	0,233	0,005	0,228	0,13	PL4_1	8,90	0,044	8,855	5,14
BN4_6	0,155	0,011	0,144	0,08	PL4_2	2,47	0,034	2,433	1,41
BN4_7	0,125	0,009	0,115	0,07	PL4_3	2,07	0,005	2,066	1,20
BN4_8	0,080	0,008	0,072	0,04	PL4_4	0,92	0,024	0,895	0,52
BN4_9	0,073	0,032	0,041	0,02	PL4_5	0,33	0,025	0,308	0,18
					PL4_6	0,20	0,017	0,186	0,11
					PL4_7	0,12	0,015	0,104	0,06
					PL4_8	0,12	0,018	0,101	0,06
					PL4_9	0,14	0,018	0,117	0,07

