

1era Ed.  
2026



PUERTO MADERO  
EDITORIAL

# ANÁLISIS DE METALES PESADOS POR ESPECTROSCOPÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA (EAA)

PARA EVALUAR LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL  
OCASIONADA POR LA CENIZA VOLCÁNICA EN  
CANTONES DE LA PROVINCIA DE CHIMBORAZO

**AUTORES:**

IRENE DEL CARMEN GAVILANES TERÁN  
STEVEN STALIN RAMOS ROMERO  
JULIO CÉSAR IDROVO NOVILLO



**EDITORES:**

JUAN CARLOS SANTILLÁN LIMA  
GUIDO PATRICIO SANTILLÁN LIMA



puertomaderoeditorial.com.ar



La Plata - Argentina

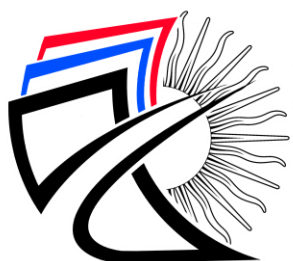


**ANÁLISIS DE METALES PESADOS POR  
ESPECTROSCOPÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA (EAA)  
PARA EVALUAR LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL  
OCASIONADA POR LA CENIZA VOLCÁNICA EN  
CANTONES DE LA PROVINCIA DE CHIMBORAZO**

**AUTORES:** Gavilanes Terán I. del C., Ramos Romero S. S.,  
Idrovo Novillo J. C.

ISBN: 978-631-6557-79-7





**PUERTO MADERO  
EDITORIAL**

**ANÁLISIS DE METALES PESADOS POR  
ESPECTROSCOPIA DE ABSORCIÓN ATÓMICA (EAA)  
PARA EVALUAR LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL  
OCASIONADA POR LA CENIZA VOLCÁNICA EN  
CANTONES DE LA PROVINCIA DE CHIMBORAZO**

**AUTORES:**

Irene del Carmen Gavilanes Terán

Steven Stalin Ramos Romero

Julio César Idrovo Novillo





Gavilanes Terán, Irene del Carmen

Análisis de metales pesados por Espectroscopía de Absorción Atómica EAA para evaluar la contaminación ambiental ocasionada por la ceniza volcánica en cantones de la provincia de Chimborazo / Irene del Carmen Gavilanes Terán ; Steven Stalin Ramos Romero ; Julio César Idrovo Novillo ; Editado por Juan Carlos Santillán Lima ; Guido Patricio Santillán Lima. - 1a ed. - La Plata : Puerto Madero Editorial Académica, 2026.  
Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online

ISBN 978-631-6557-79-7

1. Medio Ambiente. I. Santillán Lima, Juan Carlos, ed. II. Guido Patricio, Santillán Lima, ed. III. Título.  
CDD 344.046



**Licencia Creative Commons:**

Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)







Primera Edición, Mayo 2026

**TÍTULO:** Análisis de metales pesados por espectroscopía de absorción atómica (EAA) para evaluar la contaminación ambiental ocasionada por la ceniza volcánica en Cantones de la Provincia de Chimborazo

**ISBN:** 978-631-6557-79-7

**DOI:** <https://doi.org/10.55204/pmea.130>

**Editado por:**

**Sello editorial:** ©Puerto Madero Editorial Académica

**Nº de Alta:** 933832

**Editorial:** © Puerto Madero Editorial Académica

**CUIL:** 20630333971

Calle 45 N491 entre 4 y 5

Dirección de Publicaciones Científicas Puerto Madero Editorial

Académica

La Plata, Buenos Aires, Argentina

**Teléfono:** +54 9 221 314 5902

+54 9 221 531 5142

**Código Postal:** AR1900

**Este libro se sometió a arbitraje bajo el sistema de doble ciego (peer review)**

**Corrección y diseño:**

Puerto Madero Editorial Académica

Diseñador Gráfico: José Luis Santillán Lima

**Diseño, Montaje y Producción Editorial:**

Puerto Madero Editorial Académica

Diseñador Gráfico: Santillán Lima, José Luis

**Director del equipo editorial:** Santillán Lima, Juan Carlos

**Editor:** Santillán Lima, Guido Patricio  
Santillán Lima, Juan Carlos

Hecho en Argentina

Made in Argentina



## AUTORES:

### *Irene del Carmen Gavilanes Terán*

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Grupo Asociado de Investigación en Biotecnología Ambiente y Química, 060107, Riobamba, Chimborazo, Ecuador.

[irene.gavilanes@esPOCH.edu.ec](mailto:irene.gavilanes@esPOCH.edu.ec)



<https://orcid.org/0000-0001-5576-2908>

### *Steven Stalin Ramos Romero*

Universidad Politécnica Estatal del Carchi, Facultad de Industrias Agropecuarias y Ciencias Ambientales, Grupo de Investigación Agricultura Sostenible, Antisana y Av. Universitaria, 040102, Tulcán, Carchi, Ecuador.

[steven.ramos@upec.edu.ec](mailto:steven.ramos@upec.edu.ec)



<https://orcid.org/0009-0008-2570-7906>

### *Julio César Idrovo Novillo*

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Grupo Asociado de Investigación en Biotecnología Ambiente y Química, 060107, Riobamba, Chimborazo, Ecuador.

[julio.idrovo@esPOCH.edu.ec](mailto:julio.idrovo@esPOCH.edu.ec)



<https://orcid.org/0000-0001-9741-5015>



## **CONTENIDO**

|                                                                           |                     |
|---------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| <b>CONTENIDO</b>                                                          | <b><i>xi</i></b>    |
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>                                                  | <b><i>xvii</i></b>  |
| <b>ÍNDICE DE TABLAS</b>                                                   | <b><i>xix</i></b>   |
| <b>RESUMEN</b>                                                            | <b><i>xxi</i></b>   |
| <b>ABSTRACT</b>                                                           | <b><i>xxii</i></b>  |
| <b>PROLOGO</b>                                                            | <b><i>xxiii</i></b> |
| <b>INTRODUCCIÓN</b>                                                       | <b><i>1</i></b>     |
| <b>CAPÍTULO I</b>                                                         |                     |
| <b>I. FUNDAMENTOS DE LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL Y LOS METALES PESADOS</b> | <b><i>5</i></b>     |
| <b>1.1 Contaminación ambiental</b>                                        | <b><i>5</i></b>     |
| <b>1.2 Clasificación de la contaminación</b>                              | <b><i>6</i></b>     |
| 1.2.1 Según el sustrato afectado                                          | <i>6</i>            |
| 1.2.2 Según el tipo de contaminante                                       | <i>6</i>            |
| 1.2.3 Según el proceso que la causa                                       | <i>7</i>            |
| 1.2.4 Según el origen del contaminante                                    | <i>7</i>            |
| 1.2.5 Según su naturaleza química                                         | <i>8</i>            |
| 1.2.6 Según sus efectos                                                   | <i>8</i>            |
| <b>1.3 Contaminación de suelo</b>                                         | <b><i>8</i></b>     |
| 1.3.1 El suelo como sistema dinámico                                      | <i>9</i>            |
| 1.3.2 Funciones ecosistémicas del suelo                                   | <i>10</i>           |
| 1.3.3 Suelo como sumidero y fuente de metales                             | <i>10</i>           |
| 1.3.4 Procesos edáficos que controlan transporte de metales               | <i>11</i>           |
| <b>1.4 Metales pesados</b>                                                | <b><i>11</i></b>    |
| 1.4.1 Definición y criterios de clasificación                             | <i>12</i>           |
| 1.4.2 Propiedades ambientales                                             | <i>12</i>           |
| 1.4.3 Procesos de acumulación                                             | <i>13</i>           |
| 1.4.4 Metales esenciales vs. no esenciales                                | <i>13</i>           |
| 1.4.5 Especiación química                                                 | <i>15</i>           |
| 1.4.6 Factores que controlan movilidad                                    | <i>15</i>           |
| 1.4.7 Dinámica de metales en Andisoles andinos                            | <i>16</i>           |

|            |                                                                            |           |
|------------|----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1.4.8      | Comportamiento de metales en suelos volcánicos                             | 17        |
| 1.4.9      | Referencia normativa para interpretación ambiental                         | 18        |
| <b>1.5</b> | <b>Cenizas volcánicas</b>                                                  | <b>19</b> |
| 1.5.1      | Formación y fragmentación magmática                                        | 20        |
| 1.5.2      | Ciclo de vida de la ceniza volcánica                                       | 20        |
| 1.5.3      | Transformación geoquímica post-deposición                                  | 21        |
| 1.5.4      | Impactos de cenizas volcánicas:                                            | 22        |
| 1.5.5      | Efectos a largo plazo                                                      | 23        |
| <b>1.6</b> | <b>Interacción entre cenizas volcánicas y metales pesados en Ecuador</b>   | <b>23</b> |
| 1.6.1      | Dinámica de metales en suelos volcánicos andinos                           | 24        |
| 1.6.2      | Entornos volcánicos en Ecuador                                             | 25        |
| 1.6.3      | Impacto en agricultura                                                     | 26        |
| 1.6.4      | Elementos esenciales y no esenciales en cenizas                            | 27        |
| 1.6.5      | Transferencia suelo, planta y cadena alimentaria                           | 27        |
| 1.6.6      | Mecanismos de absorción y partición en tejidos vegetales                   | 29        |
| 1.6.7      | Indicadores fisicoquímicos del suelo para interpretar movilidad de metales | 29        |
| 1.6.8      | Vacíos de investigación                                                    | 30        |

## **CAPÍTULO II**

|             |                                                                  |           |
|-------------|------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>II.</b>  | <b>DISEÑO METODOLÓGICO Y FUNDAMENTOS ANALÍTICOS</b>              | <b>33</b> |
| <b>2.1</b>  | <b>Fundamentación metodológica del estudio</b>                   | <b>33</b> |
| <b>2.2</b>  | <b>Hipótesis de investigación</b>                                | <b>34</b> |
| <b>2.3</b>  | <b>Variables del estudio</b>                                     | <b>34</b> |
| <b>2.4</b>  | <b>Operacionalización de variables</b>                           | <b>35</b> |
| <b>2.5</b>  | <b>Enfoque y tipo de investigación</b>                           | <b>35</b> |
| <b>2.6</b>  | <b>Estructura general del estudio</b>                            | <b>36</b> |
| <b>2.7</b>  | <b>Área de estudio</b>                                           | <b>36</b> |
| 2.7.1       | Ubicación geográfica                                             | 37        |
| 2.7.2       | Características agroecológicas                                   | 38        |
| 2.7.3       | Diagnóstico socioambiental                                       | 39        |
| <b>2.8</b>  | <b>Diseño muestral</b>                                           | <b>40</b> |
| <b>2.9</b>  | <b>Determinación del tamaño de muestra</b>                       | <b>40</b> |
| <b>2.10</b> | <b>Identificación y georreferenciación de puntos de muestreo</b> | <b>41</b> |
| <b>2.11</b> | <b>Procedimiento experimental</b>                                | <b>43</b> |

|                                                                       |                                                                            |           |
|-----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.11.1                                                                | Toma y preparación de muestras                                             | 43        |
| 2.11.2                                                                | Digestión ácida                                                            | 43        |
| 2.11.3                                                                | Determinación de parámetros fisicoquímicos                                 | 44        |
| <b>2.12</b>                                                           | <b>Espectroscopía de Absorción Atómica (AAS)</b>                           | <b>44</b> |
| <b>2.13</b>                                                           | <b>Espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS)</b> | <b>46</b> |
| <b>2.14</b>                                                           | <b>Método de atomización</b>                                               | <b>47</b> |
| <b>2.15</b>                                                           | <b>Control de calidad analítica</b>                                        | <b>47</b> |
| <b>2.16</b>                                                           | <b>Análisis estadístico</b>                                                | <b>48</b> |
| <b>2.17</b>                                                           | <b>Criterios normativos de referencia</b>                                  | <b>48</b> |
| <b>2.18</b>                                                           | <b>Evaluación de impacto ambiental</b>                                     | <b>49</b> |
| 2.18.1                                                                | Aplicación de la Matriz de Leopold                                         | 50        |
| <b>2.19</b>                                                           | <b>Limitaciones del estudio</b>                                            | <b>51</b> |
| <b>2.20</b>                                                           | <b>Modelo conceptual del estudio</b>                                       | <b>52</b> |
| <b>CAPÍTULO III</b>                                                   |                                                                            |           |
| <b>III. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LA DINÁMICA GEOQUÍMICA EN SUELOS</b> |                                                                            |           |
| <b>AGRÍCOLAS</b>                                                      |                                                                            | <b>54</b> |
| <b>3.1</b>                                                            | <b>Caracterización fisicoquímica comparativa por cantón</b>                | <b>54</b> |
| 3.1.1                                                                 | Variabilidad del pH por cantón                                             | 55        |
| 3.1.2                                                                 | Conductividad eléctrica                                                    | 56        |
| 3.1.3                                                                 | Materia orgánica                                                           | 57        |
| 3.1.4                                                                 | Capacidad de intercambio catiónico                                         | 57        |
| 3.1.5                                                                 | Densidad real                                                              | 58        |
| 3.1.6                                                                 | Densidad aparente                                                          | 59        |
| <b>3.2</b>                                                            | <b>Macronutrientes y elementos intercambiables</b>                         | <b>59</b> |
| 3.2.1                                                                 | Carbono                                                                    | 60        |
| 3.2.2                                                                 | Nitrógeno                                                                  | 61        |
| 3.2.3                                                                 | Relación C/N                                                               | 62        |
| 3.2.4                                                                 | Fósforo disponible                                                         | 63        |
| 3.2.5                                                                 | Sodio                                                                      | 63        |
| 3.2.6                                                                 | Potasio                                                                    | 64        |
| <b>3.3</b>                                                            | <b>Micronutrientes del suelo</b>                                           | <b>65</b> |
| 3.3.1                                                                 | Manganeso (Mn)                                                             | 66        |
| 3.3.2                                                                 | Cobre (Cu)                                                                 | 67        |

|                                                           |                                                                                                        |            |
|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.3.3                                                     | Zinc (Zn)                                                                                              | 68         |
| 3.3.4                                                     | Hierro (Fe)                                                                                            | 69         |
| <b>3.4</b>                                                | <b>Metales pesados</b>                                                                                 | <b>69</b>  |
| 3.4.1                                                     | Metales no detectados o bajo límite de detección                                                       | 71         |
| 3.4.2                                                     | Níquel (Ni)                                                                                            | 72         |
| 3.4.3                                                     | Arsénico (As)                                                                                          | 73         |
| 3.4.4                                                     | Selenio (Se)                                                                                           | 74         |
| <b>3.5</b>                                                | <b>Aniones</b>                                                                                         | <b>74</b>  |
| <b>3.6</b>                                                | <b>Transferencia suelo-planta (Biomasa vegetal)</b>                                                    | <b>76</b>  |
| <b>3.7</b>                                                | <b>Evaluación del impacto ambiental mediante Matriz de Leopold</b>                                     | <b>78</b>  |
| Tabla 29: Matriz de Leopold de Riobamba                   |                                                                                                        | 79         |
| Tabla 30: Matriz de Leopold en el cantón Alausí y Chunchi |                                                                                                        | 82         |
| Tabla 31: Matriz de Leopold en el cantón Alausí y Chunchi |                                                                                                        | 85         |
| <b>3.8</b>                                                | <b>Evaluación integrada del riesgo ambiental</b>                                                       | <b>95</b>  |
| <b>CAPÍTULO IV</b>                                        |                                                                                                        |            |
| <b>IV.</b>                                                | <b>DISCUSIÓN E INTERPRETACIÓN INTEGRADA DE RESULTADOS</b>                                              | <b>97</b>  |
| <b>4.1</b>                                                | <b>Dinámica geoquímica en suelos volcánicos andinos: estabilidad aparente y complejidad subyacente</b> | <b>98</b>  |
| <b>4.2</b>                                                | <b>Variabilidad fisicoquímica: lectura mecanística del pH, MO, textura, densidades y CIC</b>           | <b>99</b>  |
| <b>4.3</b>                                                | <b>Macronutrientes y elementos intercambiables: señales edáficas versus señales de manejo agrícola</b> | <b>102</b> |
| 4.3.1                                                     | Sodio, cloruros y sulfatos: señales de salinidad y posibles implicaciones geoquímicas                  | 104        |
| <b>4.4</b>                                                | <b>Micronutrientes (Mn, Fe, Cu, Zn): firma geoquímica territorial y plausibles efectos de matriz</b>   | <b>105</b> |
| <b>4.5</b>                                                | <b>Micronutrientes (Fe y Mn) como moduladores de retención de arsénico</b>                             | <b>106</b> |
| <b>4.6</b>                                                | <b>Metales pesados en suelo: interpretación de “no detección”, hotspots y comparación con umbrales</b> | <b>107</b> |
| 4.6.1                                                     | Comparación porcentual respecto a umbrales                                                             | 108        |
| 4.6.2                                                     | Discusión de límites: total vs biodisponible                                                           | 109        |
| 4.6.3                                                     | Hotspots geoquímicos: interpretación territorial                                                       | 111        |



|                                   |                                                                                                               |            |
|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>4.7</b>                        | <b>Aniones y química iónica: vínculos con ceniza, fertilización y movilidad metálica</b>                      | <b>112</b> |
| 4.7.1                             | Arsénico elevado en raíces: hipótesis explicativas y control de calidad                                       | 113        |
| 4.7.2                             | Nitratos (Guamote): manejo agrícola y riesgo hídrico                                                          | 114        |
| 4.7.3                             | Sulfatos (Riobamba): ceniza/fertilización y especiación                                                       | 115        |
| 4.7.4                             | Fosfatos: competencia con arseniatos                                                                          | 116        |
| <b>4.8</b>                        | <b>Transferencia suelo-planta: evidencia de retención radicular y un hallazgo crítico en arsénico</b>         | <b>117</b> |
| 4.8.1                             | Factores de bioconcentración y translocación                                                                  | 119        |
| 4.8.2                             | Barrera radicular y riesgo en producto                                                                        | 120        |
| 4.8.3                             | El caso crítico del As en raíces                                                                              | 122        |
| <b>4.9</b>                        | <b>Evaluación integrada del impacto: Matriz de Leopold, riesgo actual y riesgo potencial</b>                  | <b>123</b> |
| <b>4.10</b>                       | <b>Contaminación versus enriquecimiento natural: implicaciones epistemológicas y necesidad de líneas base</b> | <b>124</b> |
| <b>4.11</b>                       | <b>Limitaciones, control de calidad e incertidumbre: transparencia científica</b>                             | <b>125</b> |
| <b>4.12</b>                       | <b>Implicaciones para gestión territorial y recomendaciones basadas en evidencia</b>                          | <b>125</b> |
| <b>4.13</b>                       | <b>Síntesis interpretativa</b>                                                                                | <b>126</b> |
| <b>Referencias Bibliográficas</b> |                                                                                                               | <b>127</b> |
| <b>DE LOS AUTORES</b>             |                                                                                                               | <b>139</b> |
| Irene del Carmen Gavilanes Terán  |                                                                                                               | 139        |
| Steven Stalin Ramos Romero        |                                                                                                               | 141        |
| Julio César Idrovo Novillo        |                                                                                                               | 143        |



## **ÍNDICE DE FIGURAS**

|                                                                                                                        |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 1: Influencia del pH en la movilidad y retención de metales en el suelo.....                                    | 16  |
| Figura 2: Ciclo de vida de las cenizas volcánicas.....                                                                 | 21  |
| Figura 3: Procesos geoquímicos posteriores a la deposición de ceniza volcánica.....                                    | 22  |
| Figura 4: Interacción entre cenizas volcánicas y metales pesados en sistemas edáficos.....                             | 24  |
| Figura 5: Esquema conceptual de la transferencia de metales pesados en el sistema suelo–planta–cadena alimentaria..... | 28  |
| Figura 6: Factores fisicoquímicos que regulan la transferencia suelo–planta.....                                       | 30  |
| Figura 7: Ubicación de los cantones de estudio en la provincia de Chimborazo.....                                      | 38  |
| Figura 8: Esquema básico de un espectrómetro de absorción atómica con atomización en llama (AAS). .....                | 45  |
| Figura 9: Diagrama ICP-MS.....                                                                                         | 47  |
| Figura 10: Matriz de Leopold aplicada al sistema agrícola bajo influencia volcánica.....                               | 94  |
| Figura 11: Variabilidad inter-cantonal de variables edáficas y metálicas (media±DE; mínimo–máximo).....                | 101 |
| Figura 12: Matriz de calor cantón × variables (valores estandarizados z). .....                                        | 103 |



## **ÍNDICE DE TABLAS**

|                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1: Coordenadas geográficas y altitud de los puntos de muestreo en la provincia de Chimborazo. ....     | 42 |
| Tabla 2: Valores guía normativos referenciales para metales pesados en suelos agrícolas (mg/kg). ....        | 49 |
| Tabla 3: Comparación fisicoquímica inter-cantonal de suelos agrícolas bajo influencia volcánica.             | 55 |
| Tabla 4: Estadísticos descriptivos y análisis de varianza del pH por cantón. ....                            | 56 |
| Tabla 5: Estadísticos descriptivos y ANOVA para la Conductividad Eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). .... | 56 |
| Tabla 6: Estadísticos descriptivos y ANOVA para la Materia Orgánica (%). ....                                | 57 |
| Tabla 7: Estadísticos descriptivos y ANOVA para la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC). ...             | 58 |
| Tabla 8: Estadísticos descriptivos y ANOVA para la Densidad Real ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ). ....            | 58 |
| Tabla 9: Estadísticos descriptivos y ANOVA para la Densidad Aparente ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ). ....        | 59 |
| Tabla 10: Estadísticos descriptivos de macronutrientes y elementos intercambiables por cantón. ....          | 60 |
| Tabla 11: Estadísticos descriptivos y comparación múltiple para Carbono (%). ....                            | 61 |
| Tabla 12: Estadísticos descriptivos y comparación múltiple para Nitrógeno (%) ....                           | 61 |
| Tabla 13: Estadísticos descriptivos y comparación múltiple para la Relación C/N. ....                        | 62 |
| Tabla 14: Estadísticos descriptivos y comparación múltiple para Fósforo (ppm). ....                          | 63 |
| Tabla 15: Estadísticos descriptivos y comparación múltiple para Sodio (ppm). ....                            | 64 |
| Tabla 16: Estadísticos descriptivos y comparación múltiple para Potasio (ppm). ....                          | 65 |
| Tabla 17: Estadísticos descriptivos de micronutrientes por cantón. ....                                      | 66 |
| Tabla 18: Estadísticos descriptivos y comparación múltiple para Manganeso. ....                              | 67 |
| Tabla 19: Estadísticos descriptivos y comparación múltiple para Cobre. ....                                  | 67 |
| Tabla 20: Estadísticos descriptivos y comparación múltiple para Zinc ....                                    | 68 |
| Tabla 21: Estadísticos descriptivos y comparación múltiple para Hierro. ....                                 | 69 |
| Tabla 22: Estadísticos descriptivos de metales pesados por cantón. ....                                      | 70 |
| Tabla 23: Frecuencia de detección de metales bajo límite analítico. ....                                     | 71 |
| Tabla 24: Estadísticos descriptivos y comparación múltiple para Níquel (ppm). ....                           | 72 |
| Tabla 25: Estadísticos descriptivos y comparación múltiple para Arsénico (ppm). ....                         | 73 |
| Tabla 26: Estadísticos descriptivos y comparación múltiple para Selenio (ppm). ....                          | 74 |
| Tabla 27: Estadísticos descriptivos de aniones por cantón. ....                                              | 75 |

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 28: Concentración de metales y sodio en biomasa vegetal (ppm, base seca) ..... | 77 |
| Tabla 29: Matriz de Leopold de Riobamba .....                                        | 79 |
| Tabla 30: Matriz de Leopold en el cantón Alausí y Chunchi .....                      | 82 |
| Tabla 31: Matriz de Leopold en el cantón Alausí y Chunchi .....                      | 85 |
| Tabla 32: Matriz de Leopold del cantón Guamote. ....                                 | 89 |

## RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar la posible acumulación de metales pesados en suelos agrícolas de los cantones Alausí, Chunchi, Riobamba y Guamote, provincia de Chimborazo, expuestos a la deposición de ceniza volcánica proveniente del volcán Sangay, con el propósito de analizar su comportamiento geoquímico y su potencial impacto ambiental en sistemas productivos andinos. Se establecieron quince puntos de muestreo georreferenciados en zonas agrícolas afectadas por caída de ceniza, recolectándose muestras del horizonte superficial, las cuales fueron sometidas a digestión ácida y analizadas mediante Espectroscopía de Absorción Atómica, complementada con Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente. Asimismo, se determinaron parámetros fisicoquímicos del suelo pH, conductividad eléctrica, materia orgánica y capacidad de intercambio catiónico debido a su influencia en la movilidad y biodisponibilidad de los metales, e integró la evaluación ambiental mediante la aplicación de la Matriz de Leopold. Los resultados evidenciaron variabilidad espacial significativa tanto en las propiedades edáficas como en las concentraciones de elementos traza; en términos generales, los suelos presentan condiciones adecuadas para la actividad agrícola, aunque se identificaron diferencias que inciden en la dinámica metálica, especialmente asociadas al pH y a la capacidad de intercambio catiónico. Se concluye que, si bien no se detectaron niveles críticos generalizados de contaminación, la persistencia de metales en entornos volcánicos activos requiere monitoreo continuo debido a su potencial transferencia a la cadena alimentaria y al riesgo ambiental a mediano y largo plazo.

**Palabras clave:** ceniza volcánica, metales pesados, suelos agrícolas, espectroscopía de absorción atómica, contaminación ambiental, movilidad geoquímica, impacto ambiental.

## ABSTRACT

The present study aimed to evaluate the potential accumulation of heavy metals in agricultural soils of the Alausí, Chunchi, Riobamba and Guamote cantons, Chimborazo Province, exposed to volcanic ash deposition from the Sangay volcano, in order to analyze their geochemical behavior and potential environmental impact on Andean production systems. Fifteen georeferenced sampling points were established in agricultural areas affected by ash fall, where surface soil samples were collected, subjected to acid digestion, and analyzed using Atomic Absorption Spectroscopy, complemented by Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry. In addition, key physicochemical soil parameters pH, electrical conductivity, organic matter content, and cation exchange capacity were determined due to their influence on metal mobility and bioavailability, and environmental impact was integrated through the application of the Leopold Matrix. The results revealed significant spatial variability in both soil properties and trace element concentrations. Overall, the soils exhibited conditions suitable for agricultural activity; however, differences were identified that influence metal dynamics, particularly those associated with pH and cation exchange capacity. It is concluded that, although no generalized critical levels of contamination were detected, the persistence of metals in active volcanic environments requires continuous monitoring due to their potential transfer into the food chain and the associated medium- and long-term environmental risk.

**Keywords:** volcanic ash, heavy metals, agricultural soils, atomic absorption spectroscopy, environmental contamination, geochemical mobility, environmental impact.



## **PROLOGO**

Hay territorios donde la naturaleza no es un telón de fondo, sino una presencia constante que dialoga a veces con generosidad y otras con fuerza con la vida humana. La región andina del Ecuador es uno de esos espacios. Allí, los volcanes no son únicamente formaciones geológicas: son parte de la historia, de la fertilidad del suelo, de la identidad productiva y también de la incertidumbre cotidiana de quienes viven y trabajan en sus laderas.

Cuando tuve la oportunidad de acercarme a esta obra, comprendí que no se trataba simplemente de un estudio técnico sobre metales pesados o análisis instrumental de laboratorio. Este libro nace de una pregunta más profunda: ¿qué ocurre en el suelo, en los cultivos y en la cadena alimentaria cuando la ceniza volcánica se deposita de manera recurrente sobre territorios agrícolas? ¿Cómo dialogan la geología, la química y la vida humana en contextos de actividad volcánica activa?

La investigación que aquí se presenta examina con rigor la interacción entre la deposición de ceniza del volcán Sangay y la dinámica de metales pesados en los suelos agrícolas de Alausí, Chunchi, Riobamba y Guamote, en la provincia de Chimborazo. A través de técnicas analíticas de alta precisión como la Espectroscopía de Absorción Atómica (AAS) y la Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS), el autor no solo cuantifica concentraciones, sino que interpreta procesos: movilidad, biodisponibilidad, transferencia suelo-planta y posibles implicaciones ambientales.

Uno de los méritos más significativos de esta obra radica en su capacidad para integrar ciencia analítica rigurosa con realidad territorial. Aquí no encontramos datos aislados, sino evidencia contextualizada. El suelo es abordado como un sistema dinámico donde convergen procesos geológicos, edáficos y sociales. La ceniza volcánica aparece en su doble naturaleza: fertilizante potencial

y posible vector de elementos traza. Ese equilibrio delicado entre enriquecimiento y riesgo constituye el núcleo conceptual del libro.

Más allá de los resultados experimentales, el texto invita a reflexionar sobre la vulnerabilidad y resiliencia de las comunidades agrícolas que dependen directamente de la calidad del suelo. La obra trasciende el laboratorio y se proyecta hacia la gestión ambiental, seguridad alimentaria y toma de decisiones basada en evidencia científica.

Este libro aporta conocimiento local con alcance global sobre los sistemas volcánico-agrícolas puesto que no son exclusivos del Ecuador; siendo que estos están presentes en múltiples regiones del mundo. Sin embargo, cada territorio tiene su particularidad, y comprenderla es un paso esencial hacia la sostenibilidad. La rigurosidad metodológica, la claridad conceptual y la integración interdisciplinaria convierten esta publicación en una referencia valiosa para investigadores, estudiantes, profesionales ambientales y responsables de políticas públicas.

Invito al lector a recorrer estas páginas con mirada crítica y abierta. En ellas encontrará no solo resultados científicos, sino también una invitación a entender el suelo como un regulador activo del equilibrio territorial, y la ciencia como herramienta indispensable para anticipar riesgos y fortalecer la resiliencia de las comunidades expuestas a fenómenos naturales recurrentes.

Porque comprender lo que ocurre bajo nuestros pies es, en última instancia, comprender el futuro que cultivamos.

## **INTRODUCCIÓN**

Desde tiempos ancestrales, los pueblos andinos han convivido con la presencia constante de los volcanes. Estas estructuras geológicas no solo han modelado el relieve y condicionado la fertilidad de los suelos, sino que también han influido profundamente en la organización social, económica y cultural de las comunidades asentadas en sus laderas (Pardo et al., 2021). Ecuador, ubicado en el Cinturón de Fuego del Pacífico, la actividad volcánica es un proceso estructural de su realidad geológica y productiva (Mihai et al., 2025). La agricultura andina, refinada a través de siglos en suelos volcánicos nativos, es un ejemplo singular de la armoniosa interacción entre procesos geológicos y humanos.

Ecuador, situado en el Cinturón de Fuego del Pacífico, la actividad volcánica es un proceso estructural de su geología y productividad (Mihai et al., 2025). La agricultura andina, perfeccionada durante siglos en suelos volcánicos autóctonos, es un ejemplo único de interacción entre procesos geológicos y humanos. El Ecuador cuenta con más de ochenta volcanes reconocidos, muchos de ellos activos o potencialmente activos. Los Andes forman parte del Cinturón de Fuego, que escribe una imposible historia geológica y modela paisaje y suelo agrícola, como en las provincias interandinas, como Chimborazo. Las erupciones volcánicas, al eyectar materiales piroclásticos y ceniza fina, suelen introducir nuevos minerales que cambian la naturaleza del régimen edáfico (Setiawati et al., 2024).

La caída de ceniza volcánica es un evento recurrente que depende de la magnitud volcánica, la dirección del viento, la altura y las condiciones atmosféricas (Shoji et al., 2006). Las partículas finas pueden permanecer en suspensión durante horas o días y ser transportadas a cientos de kilómetros antes de depositarse, redistribuyendo el material volcánico sobre las tierras cultivadas.

Y esto no siempre es bueno. Si bien a largo plazo la ceniza puede enriquecer el suelo, en el corto y mediano plazo puede alterar sus propiedades físicas y

químicas, como el pH, la conductividad eléctrica, la capacidad de intercambio catiónico y la disponibilidad de nutrientes (Mihai et al., 2025).

Además, los materiales piroclásticos pueden contener altas concentraciones variables de elementos traza, incluidos metales pesados, cuya movilidad y biodisponibilidad están controladas por las condiciones edáficas y ambientales (Diop & Ouddane, 2020).

Los suelos volcánicos, generalmente Andisoles, son diferentes de otros órdenes de suelo. Son muy porosos, de baja densidad aparente y alta capacidad de retención de agua (Takahashi, 2020), pero con alta capacidad de fijación de fósforo por minerales amorfos ricos en aluminio y hierro, limitando la disponibilidad de nutrientes para las plantas.

En los Andes, la mezcla de ceniza reciente con los horizontes superficiales del suelo puede modificar transitoriamente su acidez, conductividad eléctrica y capacidad de intercambio catiónico (Lubis et al., 2021). Estos cambios modifican el equilibrio químico en el sistema suelo-planta y la disponibilidad de elementos traza, bien en sentido de lixiviación o de acumulación superficial.

Los metales pesados son densos y permanecen en el ambiente. Algunos son necesarios en pequeñas cantidades (hierro, manganeso, zinc), pero otros son tóxicos incluso en concentraciones muy bajas (arsénico, cadmio, plomo, mercurio) (WHO, 2017). Su destino en el suelo está controlado por procesos fisicoquímicos como adsorción en superficies minerales, intercambio iónico, precipitación y complejación con materia orgánica (Dahlgren et al., 2004). Estos determinan su movilidad, biodisponibilidad y transferencia a la cadena alimentaria.

En suelos volcánicos jóvenes, la cinética de los metales pesados se complica por la mineralogía del material parental. La meteorización de vidrio volcánico, feldespatos y minerales ferromagnesianos puede liberar oligoelementos al suelo (M. J. Wilson et al., 2008). La disponibilidad de estos nutrientes está

regulada por el pH, la materia orgánica, la textura y la actividad microbiana del suelo.

En condiciones ligeramente ácidas, algunos metales se vuelven más solubles; en cambio, a pH cercano a la neutralidad se inmovilizan por adsorción o precipitación (Vicar et al., 2024). La meteorización física y química es un proceso gradual que va alterando los materiales volcánicos. Tras la caída de ceniza, las partículas se transforman por el agua, los cambios de temperatura y la actividad biológica (Delmelle et al., 2015).

La hidrólisis de silicatos y la neoformación de minerales secundarios modifican con el tiempo la composición del horizonte superficial, liberando o reteniendo elementos traza, según su estabilidad mineralógica y el microambiente edáfico (Tan et al., 2014). En los altos Andes (como Chimborazo), la estacionalidad de lluvias genera ciclos alternados de disolución y precipitación que redistribuyen verticalmente los metales. La fracción fina de la ceniza, por su elevada superficie específica, se llega a asociar íntimamente con coloides orgánicos e inorgánicos, generando puntos activos de adsorción (Rammal Jana et al., 2025).

Pero en condiciones de saturación hídrica o cambios de acidez, ciertos metales pueden liberarse y desplazarse a horizontes subsuperficiales, donde pueden ser capturados por sistemas radiculares. La transferencia de metales desde el suelo a las plantas es un indicador para valorar el impacto ambiental. La absorción por las raíces depende de la forma química en que se encuentren y de su concentración en la solución del suelo.

En los sistemas agrícolas convencionales, donde los cultivos se dirigen al consumo humano y animal, la acumulación progresiva de ciertos metales puede provocar procesos de bioacumulación que inicialmente pueden pasar desapercibidos (Patel et al., 2020).

En este contexto, el volcán Sangay ha provocado lluvias constantes de ceniza en zonas agrícolas de Chimborazo, particularmente en los cantones Alausí

y Chunchi; más allá de los efectos inmediatos sobre la infraestructura y el rendimiento de los cultivos, los cambios en la composición química del suelo pueden manifestarse de manera progresiva. La literatura internacional indica que los materiales volcánicos pueden enriquecer el suelo con nutrientes, pero a la vez ser portadores de elementos potencialmente tóxicos, en función de su composición mineral y las condiciones ambientales en que se depositen (Ayrís & Delmelle, 2012).

A pesar de la importancia agrícola de las zonas interandinas ecuatorianas, los estudios que combinen caracterización físicoquímica de suelos, determinación instrumental de metales pesados y evaluación estructurada de impacto ambiental son aún escasos a escala local. Aún hay una falta de conocimiento integrado sobre cómo la deposición continua de ceniza afecta la geoquímica de suelos agrícolas andinos y la posible transferencia de elementos traza a la biomasa vegetal.

Este libro llena ese vacío desde una perspectiva multidisciplinaria. Para ello, integra enfoques metodológicos diversos: la caracterización físicoquímica de los suelos, la determinación de metales pesados por espectroscopía de absorción atómica e ICP-MS, análisis estadísticos comparativos y matrices estructuradas de evaluación de impacto ambiental, con el objetivo de entender cómo se comportan los suelos agrícolas impactados por la ceniza volcánica en los cantones Alausí, Chunchi, Riobamba y Guamote. Se quiere saber si hay bioacumulación de metales pesados, cómo se distribuyen en la biomasa vegetal y cuál es el riesgo ambiental que representan. Con ello se busca proporcionar herramientas técnicas para avanzar hacia una gestión sostenible de los sistemas agrícolas andinos expuestos a volcanismo.

## **CAPÍTULO I**

### **I. FUNDAMENTOS DE LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL Y LOS METALES PESADOS**

En este capítulo se integran los conceptos teóricos que permiten estudiar la contaminación por metales en suelos volcánicos. Se abordan los principales tipos de contaminación, el suelo como sistema vivo y regulador, las características y comportamiento ambiental de los metales pesados y los procesos de generación, transporte y transformación geoquímica de las cenizas volcánicas y su interacción con los suelos agrícolas andinos.

Todos estos factores explican qué hace que los metales se queden en el suelo o se movilicen, y cómo pueden pasar a las plantas y, de ahí, a la cadena alimentaria. Es un contexto particularmente importante para los ecosistemas volcánicos del Ecuador, en los cuales la actividad volcánica determina la sostenibilidad agrícola y ambiental.

#### **1.1 Contaminación ambiental**

La contaminación ambiental se define como toda alteración de un hábitat que afecta tanto a los factores bióticos como abióticos, ya sea por la incorporación de una sustancia ajena al sistema natural (atmósfera, cuerpos de agua o suelos) o por el incremento de la concentración de una sustancia propia del sistema por encima de sus variaciones normales; dicha alteración conlleva el deterioro de los recursos naturales, renovables como no renovables, así como la afectación del funcionamiento ecológico de los ecosistemas, incidiendo negativamente en el confort, salud y bienestar de los seres vivos (Labourdet, 2023).

En regiones volcánicas, la contaminación ambiental adquiere características particulares debido a la emisión de ceniza y gases durante los procesos eruptivos, los cuales constituyen fuentes naturales de contaminantes atmosféricos. La ceniza volcánica está compuesta por partículas finas de origen mineral que pueden contener diversos elementos potencialmente tóxicos,

incluyendo metales pesados que, al ser dispersados por factores meteorológicos, pueden depositarse sobre suelos agrícolas, cuerpos de agua y áreas urbanas, afectando la calidad ambiental y aumentando la exposición de las poblaciones humanas a estos contaminantes (Shetty et al., 2023).

## **1.2 Clasificación de la contaminación**

La contaminación ambiental se puede clasificar de diferentes maneras, de acuerdo con los criterios del estudio, la finalidad técnica o el marco regulatorio en que se esté trabajando, para establecer medidas apropiadas de prevención, mitigación y control (Albert, 2004).

A continuación, se presentan las principales categorías:

### **1.2.1 Según el sustrato afectado**

La contaminación, según el medio al que afecte, se puede clasificar en atmosférica (aire), hídrica (aguas superficiales y subterráneas), del suelo, alimentaria, etc., al verse alteradas por agentes contaminantes. Esta clasificación es muy utilizada en los sistemas de vigilancia y control ambiental, para determinar el medio afectado y establecer medidas específicas de prevención, mitigación y remediación. Además, cabe destacar que los contaminantes no se quedan en un solo medio, sino que pueden pasar de un medio a otro, coexistiendo y provocando efectos simultáneos en los diferentes medios.

### **1.2.2 Según el tipo de contaminante**

La contaminación, según el tipo de contaminante, se clasifica en función de la naturaleza estos pueden ser físicos, químicos o biológicos, dependiendo de sus características y mecanismo mediante el cual generan el impacto dentro del entorno. Los contaminantes químicos incluyen sustancias orgánicas e inorgánicas capaces de modificar la composición natural del aire, agua o suelo; los físicos comprenden formas de energía como el ruido, radiación o calor que alteran las condiciones ambientales; mientras que los biológicos corresponden a



microorganismos o agentes patógenos que pueden afectar la salud de los seres vivos.

### **1.2.3 Según el proceso que la causa**

La contaminación, según el proceso que la causa, se clasifica en función del origen y la dinámica mediante la cual se genera la alteración ambiental, estas se distinguen entre contaminación de origen natural y de origen antrópico. La primera se produce como consecuencia de fenómenos naturales como erupciones volcánicas, incendios forestales, tormentas de polvo o procesos de descomposición biológica que liberan sustancias al ambiente. Por otro lado, la contaminación antrópica es resultado de actividades humanas, tales como procesos industriales, agrícolas, urbanos o transporte, que introducen o incrementan la concentración de contaminantes en los distintos medios ambientales.

### **1.2.4 Según el origen del contaminante**

Los contaminantes según su origen se clasifican en naturales y antropogénicos. Los contaminantes naturales son aquellos que forman parte de los ciclos biogeoquímicos y se encuentran de manera habitual en el ambiente en concentraciones basales, como ciertos metales traza o compuestos de origen biológico, los cuales tienden a incrementarse por procesos propios de la dinámica terrestre, atmosférica o ecológica. De igual manera, los contaminantes antropogénicos son resultado directo de actividades humanas, industriales, agrícolas, urbanas, energéticas o de transporte e incluyen tanto sustancias presentes en la naturaleza cuya concentración ha sido alterada, como compuestos sintéticos creados artificialmente, conocidos como xenobióticos. Estos últimos, como los clorofluorocarbonos (CFC) o los policlorobifenilos (PCB), se caracterizan por su elevada persistencia y por la ausencia de mecanismos naturales eficientes para su degradación, lo que favorece su acumulación y potencial toxicidad.

### **1.2.5 Según su naturaleza química**

Este tipo de contaminante se clasifica en función de la composición y estructura molecular los cuales pueden ser orgánicos e inorgánicos. Los contaminantes orgánicos están constituidos por compuestos basados en carbono, hidrocarburos, pesticidas, solventes, orgánicos volátiles y contaminantes orgánicos persistentes, muchos de los cuales presentan capacidad de bioacumulación y toxicidad prolongada. Mientras que, los contaminantes inorgánicos comprenden metales pesados, sales, ácidos, bases y otros compuestos minerales que pueden modificar las propiedades fisicoquímicas del medio y afectar la salud de los organismos (Fonfría et al., 1989).

### **1.2.6 Según sus efectos**

La contaminación, según sus efectos, se clasifica en función del impacto que los contaminantes generan sobre los organismos vivos, ecosistemas y salud humana, independientemente de su origen o naturaleza, estas pueden distinguirse entre efectos agudos, que se manifiestan de manera inmediata tras la exposición, y efectos crónicos, que se desarrollan progresivamente a largo plazo, estos impactos pueden presentarse a escala local, regional o global, dependiendo de su alcance espacial (Maldonado, 2009).

Los contaminantes sintéticos extraños a la naturaleza (xenobióticos) causan degradación de hábitats, pérdida de biodiversidad, alteración de ciclos naturales, y en suelos agrícolas disminuyen el rendimiento de cultivos, alteran la microbiota edáfica y transfieren contaminantes (metales pesados) a la cadena alimentaria, lo que representa un riesgo para la salud humana.

## **1.3 Contaminación de suelo**

El suelo es un sistema vivo y complejo en el que interactúan constantemente minerales, materia orgánica, agua, aire y organismos vivos. Esta continua interacción crea procesos físicos, químicos y biológicos como la descomposición de materia orgánica, el intercambio de nutrientes, la formación de agregados y la

actividad microbiana que le permiten mantener su estructura, fertilidad y función ecológica, y está en constante cambio por factores climáticos, biológicos y antrópicos, que definen su capacidad de autorregulación, resiliencia y vida vegetal y animal (Adimalla, 2020; Jolly et al., 2022)

La heterogeneidad del suelo determinada por su textura, contenido de materia orgánica, estructura mineralógica y estratificación vertical condiciona la capacidad de retención y movilidad de los metales pesados. En particular, las fracciones finas del suelo, como limos y arcillas, presentan mayor superficie específica y mayor contenido de materia orgánica, lo que favorece la adsorción de contaminantes en comparación con partículas más gruesas. El contenido de materia orgánica constituye uno de los factores más relevantes en la retención de metales, ya que proporciona sitios activos de unión y contribuye a la formación de complejos estables que modifican su disponibilidad ambiental (Zhang et al., 2023).

El suelo está sujeto a presiones emergentes como la presencia de microplásticos, los ciclos de congelación, deshielo y los cambios en el uso del suelo, factores que pueden modificar sus propiedades físicas y químicas, así como la dinámica de adsorción y desorción de contaminantes. Estos procesos influyen en los ciclos biogeoquímicos del carbono, nitrógeno y fósforo, afectando la calidad ambiental y la sostenibilidad de los sistemas agrícolas y naturales. (Yu et al., 2023)

### **1.3.1 El suelo como sistema dinámico**

El suelo es un sistema vivo y complejo en el que interactúan constantemente minerales, materia orgánica, agua, aire y organismos vivos. Esta interacción continua crea procesos físicos, químicos y biológicos como la descomposición de materia orgánica, el intercambio de nutrientes, la formación de agregados y la actividad microbiana que le permiten mantener su estructura, fertilidad y función ecológica, y está en constante cambio por factores climáticos, biológicos y antrópicos, que definen su capacidad de autorregulación, vida vegetal y animal (Okur & Örcen, 2020).

Desde una perspectiva ecológica y biogeoquímica reciente, se reconoce que la materia orgánica del suelo desempeña un papel catalizador en la captura y disponibilidad de recursos para los cultivos, influyendo en la retención de agua, el suministro de nitrógeno y la regulación de procesos metabólicos microbianos (King et al., 2020).

Los estudios sobre calidad del suelo ha demostrado que la variabilidad del carbono orgánico, los isótopos estables y otros indicadores edáficos responden a procesos de erosión y deposición, lo cual modifica la fertilidad y la productividad agrícola a lo largo del tiempo (Gomez et al., 2020).

### **1.3.2 Funciones ecosistémicas del suelo**

El suelo es un proveedor ecosistémico, soporte físico de la vegetación, reservorio y regulador hídrico y almacén de nutrientes para el crecimiento vegetal (Khan et al., 2023). También participa en los ciclos biogeoquímicos como el del carbono, nitrógeno y fósforo, descomponiendo la materia orgánica y reciclando los nutrientes gracias a su biota. Además, el suelo es un filtro y amortiguador natural que retiene, transforma o degrada contaminantes, protegiendo las aguas subterráneas y superficiales; por lo tanto, es garante de la seguridad alimentaria, la regulación climática y la biodiversidad (El Youssfi et al., 2023).

### **1.3.3 Suelo como sumidero y fuente de metales**

El suelo es un filtro de metales pesados, por adsorción y fijación por arcillas, materia orgánica y minerales secundarios, que los inmovilizan temporalmente y disminuyen su disponibilidad inmediata (Violante et al., 2010). Cambios de pH, humedad, potencial redox o prácticas agrícolas pueden movilizarlo y transferirlo a las plantas, aguas subterráneas o cadena trófica (García-Carmona et al., 2019); al no ser biodegradables, se acumulan en el suelo y éste se convierte en un reservorio y fuente de contaminación a largo plazo, alterando la calidad ambiental y la salud humana (Zhou et al., 2015).

### **1.3.4 Procesos edáficos que controlan transporte de metales**

El transporte de metales en el suelo está regido por procesos edáficos físicos, químicos y biológicos que definen su movilidad, sorción y biodisponibilidad. Entre los principales mecanismos se encuentran la adsorción y desorción en las superficies minerales y en la materia orgánica, el intercambio catiónico, la precipitación y disolución, y la complejación (Nederlof & Van Riemsdijk, 2023), el pH, la textura del suelo, la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y el contenido de materia orgánica son factores que influyen en la movilidad de los metales.

En suelos ácidos se favorece la solubilización de muchos metales pesados, lo que permite su movilidad y lixiviación; en suelos neutros o ligeramente alcalinos predominan procesos de adsorción y precipitación que restringen su transporte. Además, la actividad biológica y las condiciones ambientales pueden alterar el estado químico de los metales, favoreciendo su absorción por las plantas o su migración a cuerpos de agua. Todos estos procesos edáficos controlan la geoquímica de los metales en el suelo y su riesgo ambiental.

### **1.4 Metales pesados**

Los metales pesados son uno de los grupos más relevantes de contaminantes en los estudios ambientales, debido a su persistencia, bioacumulación y potencial toxicidad para los ecosistemas y la salud humana. Son químicos pesados, de alto peso atómico, que aún en pequeñas concentraciones pueden provocar daños en los seres vivos. Aunque muchos de ellos son componentes naturales de la corteza terrestre, el incremento de sus concentraciones en el medio ambiente, especialmente por causas antropogénicas (minería, industria, agricultura), ha aumentado su presencia en suelos agrícolas y sistemas productivos. Entre los más estudiados se encuentran el cadmio (Cd), plomo (Pb), mercurio (Hg), arsénico (As), cromo (Cr) y níquel (Ni). A diferencia de otros contaminantes, estos no son biodegradables, lo que permite que se acumulen en el suelo y entren en la cadena

alimentaria a través de procesos de bioacumulación y biomagnificación (Aragay et al., 2011).

Los metales pesados representan un riesgo para la salud humana, alteran la microbiota del suelo, reduciendo la diversidad y abundancia de microorganismos esenciales para los ciclos de carbono y nitrógeno. Esto puede afectar la fertilidad del suelo y la productividad agrícola, evidenciando la importancia de su monitoreo y manejo (Rashid et al., 2023).

#### **1.4.1 Definición y criterios de clasificación**

Los metales pesados se definen como elementos metálicos cuya densidad supera los 5 g/cm<sup>3</sup> (Jarup, 2003); sin embargo, su clasificación no se sustenta únicamente en este criterio físico, sino también en su comportamiento químico, persistencia ambiental, capacidad de bioacumulación y potencial toxicidad. Muchos de estos elementos forman parte natural de la corteza terrestre y se encuentran en concentraciones traza en el suelo, pero cuando sus niveles exceden los rangos naturales ya sea por procesos geológicos o actividades antropogénicas pueden convertirse en contaminantes de relevancia ambiental (Adimalla, 2020; Jolly et al., 2022).

#### **1.4.2 Propiedades ambientales**

Las propiedades ambientales de los metales pesados se determinan mediante su comportamiento, movilidad y persistencia, lo que favorece su acumulación prolongada en el suelo, el agua y sedimentos sin perder su potencial tóxico (Cao et al., 2018). Su comportamiento ambiental depende de factores como el pH, el potencial redox, textura del suelo y contenido de materia orgánica, los cuales influyen en procesos de adsorción, precipitación y lixiviación, además, estos pueden presentarse en diferentes formas químicas solubles, intercambiables, asociadas a minerales o unidas a fracciones orgánicas que determinan su movilidad y biodisponibilidad (Violante et al., 2010).

### **1.4.3 Procesos de acumulación**

Los procesos de acumulación de metales pesados se describen como la concentración progresiva en el suelo y organismos vivos, los cuales pueden darse lugar dependiendo de su fuente ya sea natural o antropogénicas, como el uso continuo de fertilizantes y pesticidas, el riego con aguas contaminadas, actividad minera, emisiones industriales o incluso la deposición volcánica, que tienden a concentrarse en la capa superficial del suelo e interactúan con las raíces y microorganismos, dado esto, los metales pueden experimentar diversos procesos de bioacumulación debido a que la absorción supera la capacidad de excreción y biomagnificación, lo que implica el aumento progresivo de su concentración a lo largo de la cadena trófica (Sidhu et al., 2017). Esta dinámica favorece su transferencia hacia animales y seres humanos, generando riesgos toxicológicos a mediano y largo plazo.

### **1.4.4 Metales esenciales vs. no esenciales**

Los metales pesados se clasifican biológicamente en esenciales y no esenciales según su función en los organismos vivos y su impacto sobre los procesos fisiológicos. Mientras que algunos metales son requeridos en pequeñas cantidades para el correcto funcionamiento de rutas metabólicas, estructurales y enzimáticas, otros no tienen función biológica y pueden resultar dañinos incluso en concentraciones bajas (Mahecha-Pulido et al., 2015).

Los metales esenciales, como zinc (Zn), manganeso (Mn), cobre (Cu), cobalto (Co), hierro (Fe) y, en algunos casos, níquel (Ni), participan en funciones bioquímicas fundamentales en los organismos vivos. Por ejemplo, el zinc forma parte de más de 300 enzimas y participa en la síntesis de proteínas, la división celular y la respuesta inmunológica, siendo indispensable para el correcto funcionamiento del sistema biológico (Jiang et al., 2018). El manganeso actúa como cofactor en enzimas antioxidantes, como la superóxido dismutasa, contribuyendo a la protección contra el estrés oxidativo y al mantenimiento del

equilibrio redox en las células (Pacheco-Marchan et al., 2025). El cobre es esencial para la función de enzimas involucradas en la respiración celular y el metabolismo del hierro, desempeñando un papel clave en la producción de energía y la actividad enzimática.

El hierro es indispensable para el transporte de oxígeno mediante la hemoglobina y participa en procesos redox dentro de las mitocondrias, esenciales para el metabolismo energético. Por su parte, el cobalto constituye un componente central de la vitamina B12, fundamental para la síntesis de ADN y el metabolismo de ácidos grasos (Ahishali et al., 2011).

Los metales pesados no esenciales, como plomo (Pb), cadmio (Cd), mercurio (Hg) y arsénico (As), no cumplen funciones biológicas conocidas y representan un riesgo significativo para los sistemas biológicos. El plomo interfiere con procesos neuroquímicos, afecta el sistema nervioso central y puede causar daños permanentes, especialmente en niños (Saleem et al., 2024).

El cadmio tiende a acumularse en riñones e hígado, provocando nefrotoxicidad y desregulación del calcio en huesos. Por su parte, el mercurio, especialmente en su forma metilada, es un potente neurotóxico que puede atravesar la barrera hematoencefálica y afectar el desarrollo neurológico. El arsénico se ha relacionado con carcinogenicidad a largo plazo y puede causar lesiones cutáneas y alteraciones cardiovasculares (Angon et al., 2024).

La distinción entre metales esenciales y no esenciales tiene implicaciones ambientales importantes. Mientras que los metales esenciales pueden incorporarse a biomoléculas vegetales y animales, los no esenciales tienden a acumularse en el suelo, siendo menos transformados biológicamente y aumentando su persistencia y riesgo a largo plazo. La movilidad y biodisponibilidad de estos metales en suelos contaminados dependen de factores como el pH, el contenido de materia orgánica y la presencia de minerales arcillosos, determinando su toxicidad potencial y su transferencia a los organismos vivos (Zhang et al., 2023).



### **1.4.5 Especiación química**

La especiación química se refiere a la distribución de un elemento en sus distintas formas químicas, según la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC), una especie química es la forma específica de un elemento definida por su estado de oxidación o estructura molecular (Templeton et al., 2000). Por lo tanto, en los metales pesados su toxicidad no solo depende únicamente de su concentración total, sino de la forma en que se encuentran presentes en el suelo o agua, ya sea como iones libres, complejos solubles, especies adsorbidas a minerales o asociadas a la materia orgánica. Estos metales se encuentran influenciadas por factores como el pH, potencial redox y composición del medio. Por ejemplo, el arsénico en su forma trivalente As (III) es considerablemente más tóxico que especies orgánicas como la arsenobetaína, de baja toxicidad (Werner et al., 2018).

### **1.4.6 Factores que controlan movilidad**

La movilidad de los metales pesados en el ambiente está determinada por una combinación de factores físicos, químicos y biológicos que influyen en su desplazamiento y disponibilidad en el suelo y el agua. Entre los principales factores se encuentran el pH, potencial redox, textura del suelo, contenido de materia orgánica y capacidad de intercambio catiónico, los cuales regulan procesos como la adsorción, desorción, precipitación, complejación y lixiviación (Collin & Doelsch, 2010). Siendo que pH en condiciones ácidas favorecen la solubilidad y movilidad de muchos metales, incrementando su biodisponibilidad y riesgo de transferencia hacia las plantas o aguas subterráneas. Asimismo, la actividad microbiana y las condiciones climáticas, como la humedad y temperatura, pueden modificar su comportamiento químico (Violante et al., 2010).



Figura 1: Influencia del pH en la movilidad y retención de metales en el suelo.  
Nota. Elaborado por los autores.

#### 1.4.7 Dinámica de metales en Andisoles andinos

Los Andisoles andinos, formados a partir de materiales volcánicos recientes, presentan propiedades fisicoquímicas particulares que influyen significativamente en la dinámica de los metales pesados. Estos suelos se caracterizan por su alta porosidad, elevado contenido de materia orgánica y presencia de minerales amorfos como alofana e imogolita, los cuales poseen una gran superficie específica y alta capacidad de adsorción (Beltrán-Dávalos et al., 2025)

Debido a estas características, los Andisoles pueden actuar tanto como sumideros como fuentes potenciales de metales. En condiciones de pH ligeramente ácido frecuentes en ecosistemas andinos la movilidad de ciertos metales puede

incrementarse, especialmente cuando existen procesos de acidificación asociados a deposición de ceniza volcánica o uso intensivo de fertilizantes. No obstante, su elevada capacidad de intercambio catiónico y el contenido de materia orgánica favorecen la retención y complejación de metales, reduciendo en muchos casos su biodisponibilidad.

La dinámica de metales en estos suelos depende, por tanto, de la interacción entre mineralogía volcánica, pH, contenido orgánico y condiciones climáticas de alta precipitación propias de la región andina, factores que determinan su transporte vertical, lixiviación y posible incorporación a la cadena alimentaria.

#### **1.4.8 Comportamiento de metales en suelos volcánicos**

El comportamiento de los metales en suelos volcánicos está determinado por la naturaleza mineralógica del material parental, la presencia de compuestos amorfos y el contenido de materia orgánica, factores que influyen directamente en su adsorción, retención y movilidad. Estos suelos, generalmente derivados de cenizas y piroclastos, presentan alta capacidad de fijación debido a la abundancia de minerales como alofana, imogolita y óxidos de hierro y aluminio, que favorecen procesos de intercambio catiónico y complejación (Takahashi, 2020). Sin embargo, variaciones en el pH, condiciones redox, precipitación y prácticas agrícolas pueden alterar el equilibrio químico, promoviendo la solubilización y lixiviación de ciertos metales, especialmente en ambientes de alta pluviosidad. Por ello, el comportamiento de los metales en suelos volcánicos responde a una interacción dinámica entre propiedades fisicoquímicas, procesos edáficos y factores ambientales que determinan su biodisponibilidad y posible transferencia a la cadena trófica.

Adicionalmente, la materia orgánica y los coloides del suelo en estos suelos volcánicos desempeñan un papel crítico en la retención de metales pesados. La formación de complejos orgánico-metálicos estables contribuye a reducir la

biodisponibilidad de elementos como Cd, Pb, Zn y Cu, modulando su movilidad y toxicidad potencial (Ma et al., 2019).

La dinámica del pH y las condiciones redox también impacta significativamente en la liberación o inmovilización de metales. En suelos volcánicos con episodios de anoxia o saturación de agua, la reducción de óxidos de hierro y manganeso puede liberar metales previamente adsorbidos, incrementando su movilidad y riesgo de transferencia a plantas y aguas superficiales. Por otra parte, las prácticas agrícolas, como el riego, aplicación de fertilizantes o enmiendas orgánicas, pueden modificar la química del suelo, alterando el equilibrio de adsorción de metales. Estas modificaciones pueden favorecer tanto la inmovilización como la movilización de metales, afectando la biodisponibilidad y potencial toxicidad para la cadena trófica (Fernandez et al., 2022).

#### **1.4.9 Referencia normativa para interpretación ambiental**

La interpretación ambiental de la presencia de metales pesados en suelos agrícolas requiere su comparación con límites máximos permisibles establecidos en normativas nacionales e internacionales, los cuales definen concentraciones de referencia para prevenir riesgos ecológicos y para la salud humana. Estas regulaciones permiten determinar si los niveles detectados corresponden a condiciones naturales del suelo o si evidencian contaminación que amerite medidas de control, mitigación o remediación. En el contexto ecuatoriano, instrumentos como el Acuerdo Ministerial 097-A establecen criterios técnicos para la evaluación de calidad de suelos y biomasa, mientras que organismos internacionales como la FAO y la OMS proporcionan lineamientos complementarios para la protección ambiental y la seguridad alimentaria. De esta manera, la referencia normativa constituye un marco esencial para contextualizar los resultados analíticos y sustentar decisiones ambientales basadas en evidencia científica.

## **1.5 Cenizas volcánicas**

Las cenizas volcánicas son fragmentos finos de material piroclástico, generalmente menores a 2 mm de diámetro, generados durante erupciones volcánicas como resultado de la fragmentación del magma. Este proceso transforma un fundido con burbujas de gas dispersas en una fase gaseosa continua que suspende fragmentos sólidos (vidrio magmático, cristales y trozos de roca) cuya abundancia y características físicas y químicas dependen de la dinámica eruptiva. Por ello, las cenizas pueden ser transportadas por el viento a gran distancia y depositarse sobre suelos, cuerpos de agua y áreas urbanas alterando las propiedades físicas y químicas del suelo, cambiando su pH, textura, porosidad y disponibilidad de nutrientes. Si bien estas pueden enriquecer la fertilidad a largo plazo, también pueden incorporar metales potencialmente tóxicos, en función de la geoquímica del magma, por lo que su efecto puede ser positivo o negativo en función de la magnitud del evento (Ayrís & Delmelle, 2012b) sistema receptor (Ayrís & Delmelle, 2012).

Las cenizas volcánicas presentan características únicas que las distinguen de otros sedimentos naturales. Su alto contenido de vidrio volcánico les confiere una superficie con gran capacidad de adsorción, lo que permite la retención de nutrientes esenciales como fósforo, potasio y calcio, pero también de elementos contaminantes como plomo, cadmio o arsénico, dependiendo de la composición del magma. La textura y tamaño de las partículas afectan directamente la aireación del suelo y la infiltración de agua, influyendo en la capacidad de retención hídrica y en la microbiota presente. A nivel ecológico, la deposición de cenizas puede modificar la vegetación local, afectando la germinación, crecimiento y distribución de especies vegetales, así como alterar la calidad del agua en ríos y lagos por el arrastre de minerales solubles (Cruz-Sánchez et al., 2021).

### **1.5.1 Formación y fragmentación magmática**

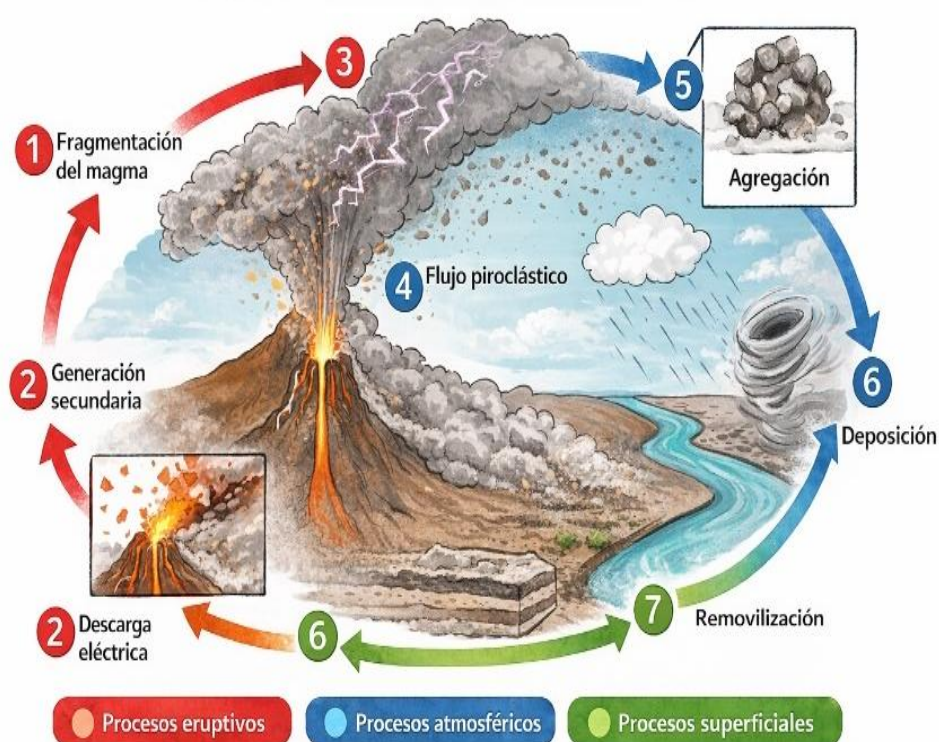
La formación de cenizas volcánicas está estrechamente relacionada con los procesos de ascenso y fragmentación del magma durante erupciones explosivas. A medida que el magma asciende hacia la superficie, la disminución de la presión favorece la exsolución y expansión de los gases disueltos, generando burbujas que incrementan la presión interna del sistema. Cuando esta presión supera la resistencia del fundido magmático, se produce la fragmentación, transformando el magma continuo en una mezcla de fase gaseosa y partículas sólidas suspendidas, conocidas como piroclastos. Este proceso determina la granulometría, morfología y composición de los fragmentos emitidos, influyendo directamente en la dispersión, transporte y comportamiento ambiental de las cenizas volcánicas.

### **1.5.2 Ciclo de vida de la ceniza volcánica**

El ciclo de vida de la ceniza volcánica comprende las etapas que van desde su generación durante la erupción hasta su incorporación y transformación en los distintos compartimentos ambientales. Tras la fragmentación magmática y expulsión hacia la atmósfera, las partículas son transportadas por corrientes de viento, pudiendo recorrer distancias variables según su tamaño y las condiciones meteorológicas. Posteriormente, se depositan sobre suelos, cuerpos de agua y superficies urbanas, donde interactúan con factores físicos, químicos y biológicos (Jenkins et al., 2015).

Con el tiempo, la ceniza puede sufrir procesos de meteorización, disolución y transformación mineralógica, liberando elementos químicos al medio e integrándose gradualmente al suelo. Dependiendo de su composición y del entorno receptor, estos procesos pueden contribuir tanto a la fertilidad del suelo como a la movilización de elementos potencialmente tóxicos, configurando así un ciclo dinámico de impacto y transformación ambiental.





*Figura 2: Ciclo de vida de las cenizas volcánicas.  
Nota. Elaborado por los Autores*

### 1.5.3 Transformación geoquímica post-deposición

La transformación geoquímica post-deposición se refiere al conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos que modifican la composición y el comportamiento de los materiales volcánicos y de los metales una vez que han sido depositados sobre el suelo. Tras la caída de ceniza, ocurren fenómenos como meteorización, disolución de minerales primarios, liberación de elementos solubles, cambios en el estado de oxidación y formación de nuevos compuestos secundarios, lo que altera la disponibilidad y movilidad de los metales (Sebola Tshisikhawe & Ngole-Jeme, 2024). Estas transformaciones están influenciadas por factores como el pH, la humedad, la temperatura, la actividad microbiana y la interacción con la materia orgánica del suelo. En consecuencia, la fase post-deposición determina si los metales permanecen retenidos en la matriz edáfica o si

son movilizados hacia aguas superficiales, subterráneas o incorporados a la biota, condicionando así su impacto ambiental

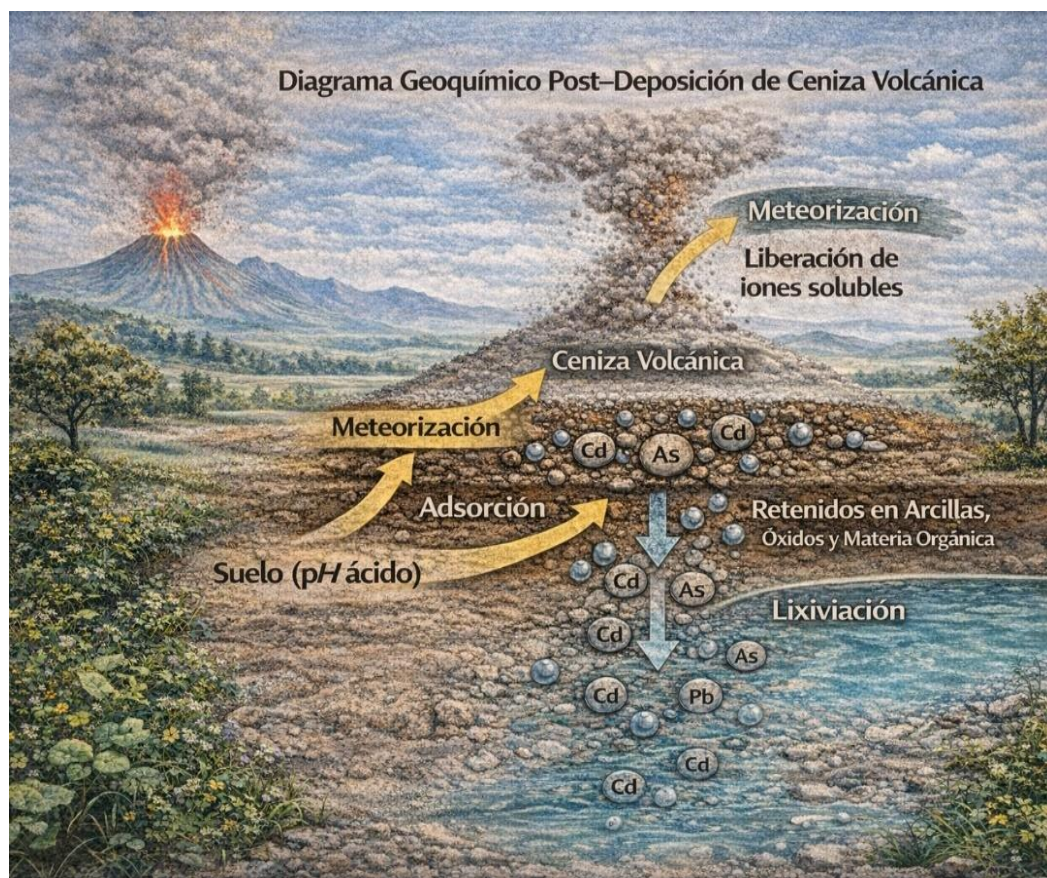


Figura 3: Procesos geoquímicos posteriores a la deposición de ceniza volcánica.  
Nota. Elaborado por los Autores

#### 1.5.4 Impactos de cenizas volcánicas:

Las cenizas volcánicas generan diversos impactos ambientales, sociales y económicos dependiendo de su volumen, composición química y duración del evento eruptivo. En el medio ambiente, su deposición puede alterar las propiedades fisicoquímicas del suelo, modificar el pH, afectar la disponibilidad de nutrientes y, en algunos casos, incorporar elementos potencialmente tóxicos. En cuerpos de agua, pueden incrementar la turbidez y alterar la calidad del recurso hídrico. Asimismo, la acumulación de ceniza sobre la vegetación puede reducir la



fotosíntesis y afectar la productividad agrícola. Estudios hechos por (Wilson et al., 2012) hablan de que las cenizas volcánicas pueden causar daños en infraestructuras, contaminar las fuentes de agua y provocar problemas de salud al ser inhaladas las partículas finas. Efectos a largo plazo.

### **1.5.5 Efectos a largo plazo**

Los efectos a largo plazo de la deposición de cenizas volcánicas dependen de su composición geoquímica, espesor acumulado y condiciones ambientales del área afectada. Con el tiempo, las cenizas se meteorizan física y químicamente, liberando lentamente nutrientes como calcio, potasio y fósforo, que pueden enriquecer el suelo y crear nuevos horizontes edáficos. Pero también pueden liberar sustancias potencialmente tóxicas, que se irían acumulando y podrían cambiar la calidad del suelo y afectar a la biota. A largo plazo, estos procesos cambian la estructura, textura y química del suelo, modificando su capacidad para retener agua y nutrientes (Horwell & Baxter, 2006). Por lo cual, la ceniza volcánica puede ser un factor de cambio ambiental a largo plazo, con efectos beneficiosos o perjudiciales en función del predominio de la fertilización o de la contaminación.

## **1.6 Interacción entre cenizas volcánicas y metales pesados en Ecuador**

En Ecuador, país localizado en el Cinturón de Fuego del Pacífico y con alta actividad volcánica, la mezcla de cenizas volcánicas y metales pesados es un factor importante en la dinámica ambiental de los suelos. La deposición continua de cenizas volcánicas puede alterar las propiedades fisicoquímicas del suelo, tales como el pH, la capacidad de intercambio catiónico y la disponibilidad de elementos traza; las cenizas pueden servir como fuente potencial de metales al incorporar los que contiene el magma o como matriz adsorbente que favorece su retención e inmovilización en el suelo (Darack, 2008). Pero en ciertas condiciones ambientales (cambios de acidez o régimen hídrico), estos metales se movilizan, aumentando su biodisponibilidad y el riesgo de transferencia a cultivos y cadenas tróficas, lo cual es significativo en áreas agrícolas cercanas a volcanes activos, donde los procesos

naturales y las actividades humanas afectan la calidad del suelo y la seguridad alimentaria (Pierson et al., 2014)



Figura 4: Interacción entre cenizas volcánicas y metales pesados en sistemas edáficos.  
Nota. Elaborado por los Autores

### 1.6.1 Dinámica de metales en suelos volcánicos andinos

La dinámica de metales en suelos volcánicos andinos está condicionada por la interacción entre la mineralogía derivada de cenizas, el contenido de materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico y las condiciones climáticas de alta precipitación propias de la región. Estos suelos, caracterizados por la presencia de minerales amorfos y óxidos de hierro y aluminio, presentan elevada capacidad de adsorción, lo que favorece la retención inicial de metales; sin embargo, variaciones en el pH, procesos de meteorización, actividad biológica y aportes continuos de

material volcánico pueden modificar su especiación química, aumentando su movilidad y posible transferencia hacia cultivos o cuerpos de agua (Ruyter-Hooley et al., 2016). En este contexto, la dinámica metálica responde a un equilibrio entre mecanismos de inmovilización y procesos de lixiviación, determinando su biodisponibilidad y el riesgo ambiental asociado.

### **1.6.2 Entornos volcánicos en Ecuador**

Ecuador está en el Cinturón de Fuego del Pacífico, una de las áreas más sísmicas del mundo, por eso tiene tantos volcanes activos o potencialmente activos. Los Andes tienen muchos centros volcánicos, con volcanes como el Cotopaxi, Tungurahua, Reventador, Sangay, etc. Estos volcanes tienen en común que generan explosiones con emisión de cenizas, gases y material piroclástico que cambian la ecología de los suelos y ecosistemas cercanos.

La lluvia continua de ceniza volcánica va alterando con el tiempo las características físicas y químicas del suelo, enriqueciéndolo en minerales y oligoelementos que pueden favorecer la fertilidad o la presencia de metales potencialmente tóxicos (Darack, 2008). Esta aportación no actúa de forma aislada, sino que se integra en el funcionamiento propio del sistema edáfico, modificando su estructura, composición y los equilibrios químicos que regulan la disponibilidad y movilidad de los elementos.

Los volcanes son sistemas naturales complejos que interactúan con procesos geológicos, atmosféricos y humanos. Esta constante interacción genera así paisajes muy complejos en los que la ceniza no es sólo un enriquecedor mineral, sino un agente geoquímico. Es en este punto donde el conocimiento de la asociación entre la deposición volcánica y el comportamiento de los metales pesados puede ayudar a entender cómo cambian estos sistemas y cómo los cambios edáficos pueden afectar la estabilidad ambiental y productiva del territorio.

### **1.6.3 Impacto en agricultura**

La actividad volcánica en Ecuador impacta a la agricultura, en especial a las áreas localizadas en las proximidades de volcanes activos, de las que depende la mayor parte de la población andina como principal medio de vida (Romero et al., 2017). La caída de ceniza y las emisiones y flujos piroclásticos han destruido repetidamente comunidades agrícolas, arrasando cosechas, matando ganado y disminuyendo la productividad (Pierson et al., 2014).

A corto plazo, la ceniza acumulada sobre la superficie foliar interfiere con la fotosíntesis y cambia la estructura de las plantas; al mismo tiempo, al mezclarse con el suelo, cambia sus propiedades fisicoquímicas (pH, conductividad eléctrica, porosidad, disponibilidad de nutrientes), y con el tiempo los procesos de meteorización liberan minerales que enriquecen el suelo y lo hacen más fértil; sin embargo, cuando la ceniza contiene metales potencialmente tóxicos, éstos pueden incorporarse al suelo y ser absorbidos por los cultivos, creando una vía de entrada a la cadena alimentaria. Por lo tanto, la interacción ceniza volcánica-suelo agrícola debe ser estudiada de manera integral en sus dimensiones físicas, químicas, toxicológicas y de monitoreo a largo plazo para conservar la calidad del suelo y garantizar la seguridad alimentaria de las poblaciones expuestas.

Además, el impacto en la agricultura se ve intensificado por factores climáticos y geográficos característicos de la región andina, como la altitud, pendientes pronunciadas y variabilidad en la precipitación, que influyen en la deposición y remoción de cenizas. La composición química de la ceniza, particularmente su contenido de sílice, aluminio, hierro y metales traza, determina la toxicidad y fertilidad potencial del suelo, afectando tanto cultivos de subsistencia (como papa, maíz y quinua) como cultivos comerciales (como flores y frutas) (Riesgo, 2025). La ceniza fina puede penetrar en el sistema radicular de las plantas, alterar la microbiota del suelo e interferir con la absorción de nutrientes esenciales y la combinación de ceniza volcánica con lluvias intensas puede generar la

movilización de elementos tóxicos hacia fuentes de agua, afectando tanto el riego como la calidad del agua potable para animales y humanos.

#### **1.6.4 Elementos esenciales y no esenciales en cenizas**

Las cenizas volcánicas presentan una composición química diversa que varía según el tipo de magma y la dinámica eruptiva que las origina. En su estructura pueden encontrarse elementos esenciales para el desarrollo de los organismos y para la fertilidad del suelo, como calcio (Ca), potasio (K), magnesio (Mg), hierro (Fe) y fósforo (P), los cuales, tras los procesos de meteorización, pueden incorporarse al sistema edáfico y contribuir al enriquecimiento mineral del suelo (Epstein & Bloom, 1985). Sin embargo, junto a estos nutrientes también pueden estar presentes elementos no esenciales o potencialmente tóxicos, como cadmio (Cd), plomo (Pb), mercurio (Hg) y arsénico (As), cuya liberación, movilidad y persistencia dependen de variables ambientales como el pH, la humedad y el potencial redox del medio (Mahecha-Pulido et al., 2015).

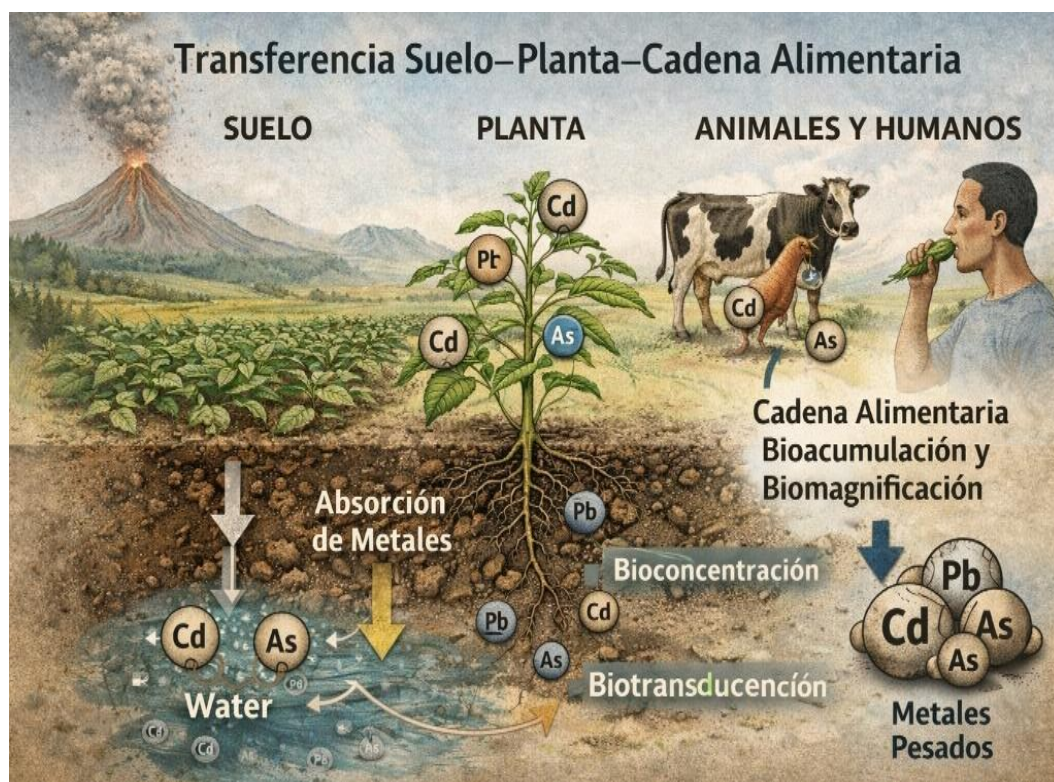
Esta coexistencia de componentes beneficiosos y potencialmente perjudiciales confiere a la ceniza volcánica un carácter dual: por un lado, puede favorecer la fertilidad del suelo a mediano y largo plazo; por otro, puede constituir una fuente de riesgo ambiental cuando los metales no esenciales alcanzan concentraciones elevadas o adquieren formas biodisponibles. En este sentido, el análisis geoquímico de las cenizas resulta indispensable para comprender su influencia en los suelos agrícolas y en los ecosistemas circundantes, así como para anticipar posibles implicaciones ambientales derivadas de su deposición (Salazar Reyes, 2011).

#### **1.6.5 Transferencia suelo, planta y cadena alimentaria**

La transferencia suelo, planta y cadena alimentaria describe el proceso mediante el cual los elementos presentes en el suelo, incluidos metales pesados, son absorbidos por las raíces de las plantas y posteriormente incorporados a los organismos que las consumen, extendiéndose a lo largo de los distintos niveles



tróficos. La disponibilidad y absorción de estos elementos dependen de factores como el pH del suelo, materia orgánica, especiación química e interacción con otros nutrientes. Cuando los metales se encuentran en formas biodisponibles, pueden acumularse en tejidos vegetales y, a través del consumo directo o indirecto, ingresan a animales y seres humanos. Este proceso puede derivar en fenómenos de bioacumulación y biomagnificación, incrementando progresivamente las concentraciones en niveles superiores de la cadena alimentaria, esta dinámica adquiere especial relevancia, ya que condiciona la calidad de los cultivos y la seguridad alimentaria, haciendo necesario un monitoreo constante de suelos y productos agrícolas (Bemelmans et al., 2024).



*Figura 5: Esquema conceptual de la transferencia de metales pesados en el sistema suelo-planta-cadena alimentaria.*

*Nota. Elaborado por los Autores*

### **1.6.6 Mecanismos de absorción y partición en tejidos vegetales**

Los metales presentes en el suelo son absorbidos por las plantas principalmente a través del sistema radicular mediante procesos de transporte pasivo y activo, influenciados por su concentración, especiación química y biodisponibilidad en la solución del suelo. Una vez incorporados, los metales pueden ser retenidos en la raíz por mecanismos de quelación y fijación en la pared celular, o bien translocados hacia órganos aéreos mediante el xilema, donde se distribuyen diferencialmente en hojas, tallos y frutos (Inouhe et al., 2012). La partición en los tejidos vegetales depende de factores como el tipo de metal, la fisiología de la planta, el pH del suelo y la presencia de compuestos orgánicos que favorecen la formación de complejos. Este proceso determina la acumulación o exclusión de metales en partes comestibles, condicionando su transferencia a la cadena alimentaria y el riesgo potencial para la salud humana.

### **1.6.7 Indicadores fisicoquímicos del suelo para interpretar movilidad de metales**

La movilidad y biodisponibilidad de los metales en el suelo pueden interpretarse mediante el análisis de indicadores fisicoquímicos que reflejan las condiciones edáficas que regulan su comportamiento. Entre los más relevantes se encuentran el pH, la conductividad eléctrica, el contenido de materia orgánica, la textura y la capacidad de intercambio catiónico (CIC), ya que estos parámetros influyen directamente en procesos como adsorción, desorción, complejación, precipitación y lixiviación (Lebron et al., 2025). Un pH ácido, por ejemplo, suele incrementar la solubilidad de varios metales pesados, favoreciendo su movilidad, mientras que mayores contenidos de materia orgánica y una elevada CIC tienden a promover su retención en la matriz del suelo. Asimismo, suelos de textura arenosa presentan menor capacidad de fijación y mayor riesgo de transporte vertical hacia acuíferos. En conjunto, estos indicadores permiten evaluar el riesgo potencial de transferencia de metales hacia cultivos y sistemas acuáticos, constituyendo

herramientas fundamentales para la interpretación ambiental en suelos volcánicos agrícolas.



*Figura 6: Factores fisicoquímicos que regulan la transferencia suelo-planta.  
Nota. Elaborado por los Autores*

### 1.6.8 Vacíos de investigación

A pesar de los avances en el estudio del impacto de la actividad volcánica en el ambiente, persisten vacíos de investigación relacionados con la deposición de elementos esenciales y no esenciales en suelos afectados por erupciones recientes y su posible transferencia a la cadena alimentaria. En zonas influenciadas por los volcanes Tungurahua y Sangay, es necesario determinar las concentraciones de metales pesados en suelos agrícolas y evaluar su movilidad, especiación y biodisponibilidad mediante técnicas analíticas confiables, como la espectroscopía



de absorción atómica. La variabilidad geoquímica de las cenizas, junto con las condiciones agroecológicas locales y las prácticas agrícolas, genera escenarios complejos que requieren estudios integrales y de largo plazo. La identificación de estos vacíos justifica el desarrollo del presente estudio, orientado a evaluar la contaminación potencial por ceniza volcánica en suelos agrícolas de la provincia de Chimborazo, contribuyendo así a la toma de decisiones ambientales y a la gestión sostenible del riesgo.



## **CAPÍTULO II**

### **II. DISEÑO METODOLÓGICO Y FUNDAMENTOS ANALÍTICOS**

El presente capítulo describe el diseño metodológico aplicado para la determinación de metales pesados en suelos agrícolas expuestos a deposición de ceniza volcánica asociada a la actividad del volcán Sangay, en los cantones Alausí, Chunchi, Riobamba y Guamote, en la provincia de Chimborazo (provincia de Chimborazo). Se presenta el enfoque y tipo de investigación, la delimitación del área de estudio, el diseño muestral, la recolección y preparación de muestras, y los fundamentos analíticos de las técnicas instrumentales utilizadas para la cuantificación de metales.

#### **2.1 Fundamentación metodológica del estudio**

La presente investigación adopta un enfoque metodológico integrador orientado a analizar la presencia y comportamiento de metales pesados en suelos agrícolas expuestos a deposición de ceniza volcánica, considerando su movilidad, biodisponibilidad y posible transferencia hacia cultivos. Este enfoque permite abordar el fenómeno desde una perspectiva sistémica que articula dimensiones geoquímicas, edáficas y productivas.

El estudio se estructuró en tres componentes complementarios: (i) un diagnóstico socioambiental para identificar la representatividad agrícola local; (ii) la evaluación geoquímica de suelos mediante muestreo y análisis instrumental de metales pesados, junto con la determinación de parámetros fisicoquímicos; y (iii) el análisis de biomasa vegetal seleccionada, con el fin de examinar la transferencia suelo-planta.

Esta articulación metodológica posibilita interpretar los resultados en función de las condiciones edáficas y del contexto productivo, integrando la evidencia analítica con criterios normativos para una evaluación ambiental fundamentada.

## **2.2 Hipótesis de investigación**

La presente investigación parte del supuesto de que la deposición de ceniza volcánica asociada a la actividad del volcán Sangay se relaciona con variaciones en la concentración de metales pesados y en las propiedades fisicoquímicas de suelos agrícolas de la provincia de Chimborazo.

En este sentido, se plantea que existen diferencias estadísticamente significativas en los niveles de metales pesados y en los parámetros fisicoquímicos del suelo entre los cantones Alausí, Chunchi, Riobamba y Guamote.

Asimismo, se considera que las diferencias observadas entre territorios se asocian con variaciones en condiciones edáficas como el pH, el contenido de materia orgánica, la conductividad eléctrica y la capacidad de intercambio catiónico, factores que influyen en el comportamiento geoquímico de los elementos traza.

Como hipótesis nula, se establece que no existen diferencias estadísticamente significativas en la concentración de metales pesados ni en las propiedades fisicoquímicas del suelo entre los cantones estudiados.

## **2.3 Variables del estudio**

El estudio se diseñó con un conjunto de variables para determinar el efecto de la deposición de ceniza volcánica sobre la dinámica de metales pesados en suelos agrícolas. La variable independiente fue la exposición a ceniza volcánica relacionada con el volcán Sangay como posible agente causante de alteraciones en la composición geoquímica del suelo.

Como variables dependientes se midieron las concentraciones de metales pesados en suelo, su movilidad y biodisponibilidad en dependencia de factores edáficos y su posible transferencia a biomasa vegetal representativa. Estas variables caracterizaron el comportamiento geoquímico y el riesgo ambiental de metales en suelos agrícolas volcánicos.

Además, se tomaron en cuenta factores intervinientes o moduladores como el pH, la materia orgánica, la conductividad eléctrica, la capacidad de intercambio catiónico y las condiciones agroecológicas locales, por su incidencia directa en los procesos de adsorción, complejación y lixiviación de metales.

## **2.4 Operacionalización de variables**

La operacionalización de variables permitió convertir los planteamientos teóricos del estudio en parámetros medibles, asegurando coherencia entre las hipótesis formuladas y los procedimientos analíticos aplicados. La variable independiente estuvo representada por la exposición a ceniza volcánica asociada a la actividad del volcán Sangay, considerada a partir de la delimitación territorial de los cantones con reportes oficiales de caída de ceniza y verificación en campo.

Las variables dependientes correspondieron a las concentraciones de metales pesados en suelo, expresadas en mg/kg de suelo seco y determinadas mediante digestión ácida y cuantificación instrumental por espectroscopía de absorción atómica e ICP-MS. La movilidad y biodisponibilidad se interpretaron en función de parámetros fisicoquímicos como pH, conductividad eléctrica, materia orgánica y capacidad de intercambio catiónico, debido a su influencia en procesos de adsorción y lixiviación. La posible transferencia suelo-planta se evaluó mediante la determinación de metales en biomasa vegetal representativa.

De esta manera, la operacionalización permitió vincular la exposición volcánica con la dinámica metálica del suelo y su potencial implicación ambiental, garantizando consistencia metodológica en el análisis y la interpretación de resultados.

## **2.5 Enfoque y tipo de investigación**

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, orientado a medir y analizar concentraciones de metales pesados en suelos agrícolas potencialmente afectados por deposición de ceniza. El estudio corresponde a un

alcance descriptivo–analítico, con diseño no experimental, dado que las variables se observaron en su entorno natural sin manipulación directa. Además, presenta un corte transversal, ya que el muestreo se realizó en un periodo definido para caracterizar el estado de los suelos en el momento de estudio.

## **2.6 Estructura general del estudio**

El desarrollo metodológico se organizó en fases secuenciales e interrelacionadas que permitieron integrar el análisis ambiental desde la escala territorial hasta la evaluación analítica de laboratorio. En una primera fase se realizó el levantamiento de información socioambiental mediante encuestas, orientado a identificar la actividad agrícola predominante y contextualizar el sistema productivo local.

En una segunda fase se ejecutó el muestreo de suelos en puntos georreferenciados previamente seleccionados, seguido de la preparación y análisis instrumental para la determinación de metales pesados y parámetros fisicoquímicos relevantes. Finalmente, se efectuó la evaluación de biomasa vegetal representativa, con el propósito de examinar la posible transferencia de metales desde el suelo hacia los cultivos.

## **2.7 Área de estudio**

El área de estudio se localiza en la provincia de Chimborazo, región interandina del Ecuador, e incluye los cantones Alausí, Chunchi, Guamote y Riobamba, seleccionados por su exposición a la deposición de ceniza volcánica asociada a la actividad del volcán Sangay y por su relevancia dentro del sistema agrícola provincial. La delimitación territorial se sustentó en reportes oficiales de caída de ceniza emitidos por el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional, así como en la importancia productiva de las zonas y la verificación en campo. Estos cantones presentan condiciones altitudinales que oscilan aproximadamente entre los 2 300 y 4 200 m s.n.m., lo que implica variabilidad

climática, edáfica y de manejo agrícola, factores determinantes en la dinámica de los metales en el suelo.

Se aplicó el mismo esquema analítico en los cuatro cantones, permitiendo la comparación inter-cantonal. La integración de estos territorios permitió abordar el estudio desde una perspectiva espacial y agroecológica, considerando la interacción entre deposición volcánica, propiedades del suelo y posibles implicaciones ambientales y productivas en sistemas agrícolas andinos bajo influencia volcánica.

### **2.7.1 Ubicación geográfica**

La investigación se desarrolló en la provincia de Chimborazo, ubicada en la región Sierra central del Ecuador, dentro del corredor andino caracterizado por alta actividad volcánica y marcada variabilidad altitudinal. Los cantones considerados en el estudio Alausí, Chunchi, Guamote y Riobamba se encuentran distribuidos en el sector centro-sur de la provincia, formando parte de un sistema territorial influenciado por la dinámica eruptiva del volcán Sangay y por condiciones climáticas propias de los Andes ecuatorianos.

Alausí y Chunchi se localizan en el extremo sur de la provincia, limitando con la provincia del Cañar; Guamote se sitúa en la zona centro-oriental; mientras que Riobamba, capital provincial, ocupa el eje central del territorio y constituye un punto estratégico de referencia geográfica y administrativa. La altitud en estas zonas varía aproximadamente entre 2 300 y más de 4 000 m s.n.m., configurando gradientes térmicos y edáficos que influyen directamente en los procesos de formación del suelo, movilidad de metales y comportamiento geoquímico bajo influencia volcánica. La delimitación espacial de los cantones de estudio se presenta en la Figura X, donde se resaltan las áreas evaluadas dentro del contexto territorial de la provincia de Chimborazo.



*Figura 7: Ubicación de los cantones de estudio en la provincia de Chimborazo.  
Nota. Elaborado por los Autores*

### 2.7.2 Características agroecológicas

Las zonas de estudio presentan condiciones agroecológicas propias de ecosistemas andinos de montaña, caracterizados por variabilidad altitudinal, regímenes térmicos moderados a fríos y suelos derivados en gran parte de



materiales volcánicos. Estas propiedades dan lugar a variaciones en la textura, el contenido de materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico y el pH del suelo, lo que afecta la movilidad y biodisponibilidad de metales pesados.

La principal actividad agrícola en los cantones estudiados son los sistemas tradicionales de altura, tales como el cultivo de maíz, pastos y otros cultivos nativos de los Andes, los cuales están expuestos a cambios climáticos. La interacción entre prácticas agrícolas, régimen de lluvia y deposición de ceniza volcánica crea un ambiente edáfico variable en el tiempo, en el que los procesos de retención, lixiviación y transferencia de metales pueden ser alterados por el manejo del suelo y las condiciones ambientales del lugar. Estas características agroecológicas son determinantes para interpretar los resultados geoquímicos y su implicación ambiental.

### **2.7.3 Diagnóstico socioambiental**

El diagnóstico socioambiental se elaboró para caracterizar el contexto productivo y la percepción local ante la caída de ceniza volcánica y su efecto potencial sobre los sistemas agrícolas. Esta etapa identificó los principales cultivos, formas de uso del suelo y el nivel de exposición que sienten los agricultores en los cantones estudiados, para establecer un contexto en el muestreo y la interpretación de resultados analíticos.

Para ello se utilizaron encuestas estructuradas dirigidas a agricultores dentro del rango de edad definido previamente, con un instrumento diseñado para recolectar información sobre la actividad productiva, frecuencia de caída de ceniza, daños observados y medidas de manejo tomadas. Los datos recolectados fueron sistematizados y analizados mediante estadística descriptiva, lo que permitió identificar el cultivo más representativo y dirigir la selección de biomasa vegetal para su posterior análisis geoquímico. Esta articulación socioambiental refuerza el diseño metodológico, enlazando la evidencia analítica con la realidad territorial y productiva de las áreas de estudio.

## **2.8 Diseño muestral**

El diseño muestral se estableció con el propósito de garantizar representatividad espacial en las zonas agrícolas bajo influencia volcánica. Se aplicó un muestreo no probabilístico de tipo dirigido, priorizando unidades productivas con actividad agrícola activa y evidencia de exposición a deposición de ceniza. La selección respondió a criterios técnicos orientados a capturar la variabilidad edáfica y altitudinal dentro de los cantones evaluados.

En cada sitio seleccionado se trabajó con muestras compuestas obtenidas a partir de submuestras distribuidas dentro de la parcela, con el fin de reducir la variabilidad puntual y obtener un perfil representativo del horizonte superficial del suelo. Este enfoque permitió asegurar consistencia en la recolección y comparabilidad entre territorios, manteniendo uniformidad en el procedimiento de muestreo para el posterior análisis geoquímico.

## **2.9 Determinación del tamaño de muestra**

La determinación del tamaño de muestra se realizó con el fin de asegurar representatividad estadística en la aplicación de encuestas dentro de la población agrícola bajo influencia volcánica. Para ello, se consideró como población objetivo el grupo etario comprendido entre 20 y 60 años, con un total de 3218 personas según registros oficiales (EPN, 2022).

El cálculo se efectuó utilizando la fórmula de Murray y Larry para poblaciones finitas, estableciendo un nivel de confianza del 95 % ( $Z = 1,96$ ), una probabilidad de ocurrencia  $p = 0,5$ , probabilidad complementaria  $q = 0,5$  y un margen de error del 5 % ( $e = 0,05$ ). Bajo estos parámetros, el tamaño de muestra obtenido fue de 343 encuestas, valor que permitió garantizar precisión en la estimación y consistencia en la interpretación de los resultados socioambientales.

$$n = \frac{Z^2 * N * p * q}{(N - 1) * e^2 + Z^2 * p * q}$$

$$n = \frac{1,96^2 * 3218 * 0,5 * 0,5}{(3218 - 1) * 0,05^2 + 1,96^2 * 0,5 * 0,5}$$

$$n = 343,28 \approx 343 \text{ encuestas}$$

n: tamaño de muestra

Z: nivel de confianza (1.96)

N: Población objetivo = 3218

p: Probabilidad de éxito (p= 0,5)

q: Probabilidad de fracaso (q= 1-p)

e: Error muestral 5%

Por lo tanto, se aplicaron 343 encuestas distribuidas proporcionalmente entre ambos cantones (223 en Alausí y 120 en Chunchi), cuyos resultados permitieron identificar el producto agrícola de mayor representatividad y orientar la selección de muestras de biomasa vegetal para el análisis posterior.

## 2.10 Identificación y georreferenciación de puntos de muestreo

La identificación de los puntos de muestreo se realizó con base en información oficial sobre áreas afectadas por deposición de ceniza y mediante verificación directa en campo, con el propósito de asegurar correspondencia entre la delimitación territorial y las condiciones reales del terreno. Cada sitio seleccionado fue georreferenciado utilizando un sistema de posicionamiento global (GPS), registrando coordenadas geográficas en formato decimal y UTM para garantizar precisión espacial y trazabilidad.

De manera complementaria, en cada punto se registraron variables ambientales básicas, como humedad relativa y temperatura, con el fin de contextualizar las condiciones microclimáticas al momento del muestreo. La Tabla 1 presenta el detalle de los sectores evaluados y la información geográfica

correspondiente, constituyendo el soporte técnico para el análisis espacial posterior.

*Tabla 1: Coordenadas geográficas y altitud de los puntos de muestreo en la provincia de Chimborazo.*

| <b>Cantón</b> | <b>Parroquia / Sector</b> | <b>Latitud (Decimal)</b> | <b>Longitud (Decimal)</b> | <b>Coordenadas UTM</b> | <b>Altitud (m s.n.m.)</b> |
|---------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|------------------------|---------------------------|
| Riobamba      | Centro                    | -1,629336                | -78,721954                | —                      | —                         |
|               | Centro- San Francisco     | -1,6248809               | -78,7491959               | —                      | —                         |
|               | Naute                     | -1,757917                | -78,677208                | —                      | —                         |
|               | Tzalaron                  | -1,776047                | -78,68425                 | —                      | —                         |
|               | Daldal                    | -1,7954194               | -78,5775194               | —                      | —                         |
|               | Aloa                      | -1,90000                 | -78,483333                | —                      | —                         |
|               | Tumbugilliron             | -1,811553                | -78,646904                | —                      | —                         |
|               | Pompeya                   | -1,808225                | -78,629547                | —                      | —                         |
|               | Centro                    | -1,716077                | -78,650116                | —                      | —                         |
|               | Guaslan Grande            | -1,721475                | -78,6373583               | —                      | —                         |
| Alausí        | Curiquinga                | -2.1891854               | -78.7576795               | —                      | —                         |
|               | Nizag                     | -2.2333248               | -78.8290360               | —                      | —                         |
|               | Curinga                   | -2.1651617               | -78.7987012               | —                      | —                         |
|               | Tixán                     | -2.1545900               | -78.8001979               | —                      | —                         |
|               | Sibambe                   | -2.2180424               | -78.8884496               | —                      | —                         |
|               | Ozogoche                  | -2.1255532               | -78.7560068               | —                      | —                         |
|               | Gonzol                    | -2.2667227               | -78.8427129               | —                      | —                         |
| Chunchi       | Zunag                     | -2.314968                | -78.895511                | —                      | —                         |
|               | Moya                      | -2.2482817               | -78.7969179               | —                      | —                         |
|               | Compud Viejo              | -2.3503129               | -78.9482340               | —                      | —                         |
|               | Chunchi Central           | -2.2763801               | -78.9219641               | —                      | —                         |
|               | Chanchán                  | -2.3030819               | -78.9329183               | —                      | —                         |
|               | Joyagshí                  | -2.3888089               | -78.9618446               | —                      | —                         |
|               | Quilambo                  | -2.3777530               | -78.9445487               | —                      | —                         |
|               | Santa Rosa                | -2.3399538               | -78.9189550               | —                      | —                         |
|               | Lirio San José            | -                        | -                         | 17 M 747546            | 3735                      |
|               |                           | 1.96645281552311         | 78.7746266574874          | 9782482                |                           |
|               | San Alfonso de Tio Cajas  | -                        | -                         | 17 M 749363            | 3584                      |
|               | San José de Sabalog       | 1.95568198974902         | 78.7583149868293          | 9783671                |                           |
|               | San Pedro de Ayacón       | -                        | -                         | 17 M 752675            | 3245                      |
|               | Tejar                     | 1.92091888133312         | 78.7286031971145          | 9787512                |                           |
|               | Balbanera                 | -                        | -                         | 17 M 755685            | 3503                      |
|               |                           | 1.94728798565504         | 78.7015240925608          | 978459                 |                           |
|               |                           | -                        | -                         | 17 M 757519            | 3049                      |
|               |                           | 1.88543320298436         | 78.6851294652379          | 9791431                |                           |

|         |                         |                  |                  |             |      |
|---------|-------------------------|------------------|------------------|-------------|------|
|         | Cabecera                | -                | -                | 17 M 762160 | 3051 |
|         | Cebadas                 | 1.91229656709049 | 78.6433979506997 | 9788453     |      |
|         | Cecel Airon             | -1.8882383564247 | -                | 17 M 762492 | 3421 |
|         |                         |                  | 78.6404479092966 | 9791114     |      |
| Guamote | Ichubamba               | -                | -                | 17 M 762983 | 3023 |
|         |                         | 1.94105893402435 | 78.6359643930864 | 9785270     |      |
|         | Pitzil                  | -                | -                | 17 M 762481 | 2965 |
|         |                         | 1.92098856936202 | 78.6405021579936 | 9787491     |      |
|         | Tres Aguas              | -                | -                | 17 M 762805 | 3001 |
|         |                         | 1.93222962219248 | 78.6375758137927 | 9786247     |      |
|         | Palmira                 | -                | -                | 17 M 751238 | 3255 |
|         | Davalos                 | 2.06348988683737 | 78.7413199377054 | 9771743     |      |
|         | Pull Chico              | -                | -                | 17 M 746117 | 3699 |
|         |                         | 2.00112190163257 | 78.7874204733958 | 9778649     |      |
|         | Pull Manuel             | -                | -                | 17 M 745194 | 3726 |
|         | Lasso                   | 1.98981447718069 | 78.7957291411311 | 9779901     |      |
|         | Pull Quishuar           | -                | -                | 17 M 745816 | 3665 |
|         |                         | 1.97934717359805 | 78.7901541039292 | 9781058     |      |
|         | San Miguel de Pomachaca | -                | -                | 17 M 748214 | 3247 |
|         |                         | 2.09517852262589 | 78.7684478844198 | 9768242     |      |

*Nota. Elaborado por los Autores*

## **2.11 Procedimiento experimental**

El procedimiento experimental se desarrolló de forma secuencial: (i) recolección de muestras compuestas del horizonte superficial en cada punto, (ii) acondicionamiento y preparación (secado, homogeneización y tamizado), (iii) digestión ácida para liberar metales de la matriz del suelo y (iv) cuantificación instrumental mediante técnicas analíticas con control de calidad.

### **2.11.1 Toma y preparación de muestras**

En cada punto georreferenciado se recolectaron submuestras del horizonte superficial, integrándolas en una muestra compuesta representativa por sitio. Se utilizaron herramientas limpias y recipientes adecuados para evitar contaminación cruzada. Cada muestra fue identificada, rotulada y almacenada para su traslado y análisis en laboratorio.

### **2.11.2 Digestión ácida**

La digestión ácida se realizó mediante digestión húmeda siguiendo lineamientos generales de AOAC, (2019). Se pesó una cantidad definida de suelo

seco y tamizado ( $\leq 2$  mm), se adicionó ácido nítrico concentrado ( $\text{HNO}_3$ ) como oxidante principal y, cuando correspondió, se complementó con  $\text{HCl}$  para favorecer la solubilización de metales asociados a fracciones minerales. El calentamiento fue controlado hasta obtener una solución clara; luego se enfrió, filtró si fue necesario, y se aforó con agua desionizada grado analítico. Se prepararon blancos de reactivos bajo condiciones equivalentes para asegurar el control de calidad.

### **2.11.3 Determinación de parámetros fisicoquímicos**

La cuantificación de metales pesados en las muestras digeridas se realizó mediante espectroscopía de absorción atómica (AAS), técnica basada en la medición de la absorbancia de radiación electromagnética por átomos libres en estado fundamental, conforme a la ley de Beer-Lambert. Para cada elemento se emplearon lámparas de cátodo hueco específicas y longitudes de onda características, garantizando selectividad y sensibilidad analítica. La atomización se efectuó mediante sistema de llama (o horno de grafito, según corresponda), y la cuantificación se realizó a partir de curvas de calibración construidas con soluciones patrón preparadas en el rango de concentración adecuado. Se utilizaron blancos de reactivos y se realizaron lecturas por triplicado para asegurar la precisión y confiabilidad de los resultados.

## **2.12 Espectroscopía de Absorción Atómica (AAS)**

La determinación principal de metales se realizó mediante espectroscopía de absorción atómica, utilizando lámparas de cátodo hueco específicas por elemento y longitudes de onda características. La atomización se efectuó por llama aire-acetileno (o por horno de grafito, según disponibilidad/condición del análisis), generando átomos libres en estado fundamental cuya absorbancia se relaciona directamente con la concentración del analito (ley de Beer-Lambert).

La cuantificación se basó en curvas de calibración con patrones certificados; las lecturas se realizaron por triplicado y los resultados se expresaron en mg/kg de suelo seco, aplicando los factores de dilución correspondientes.

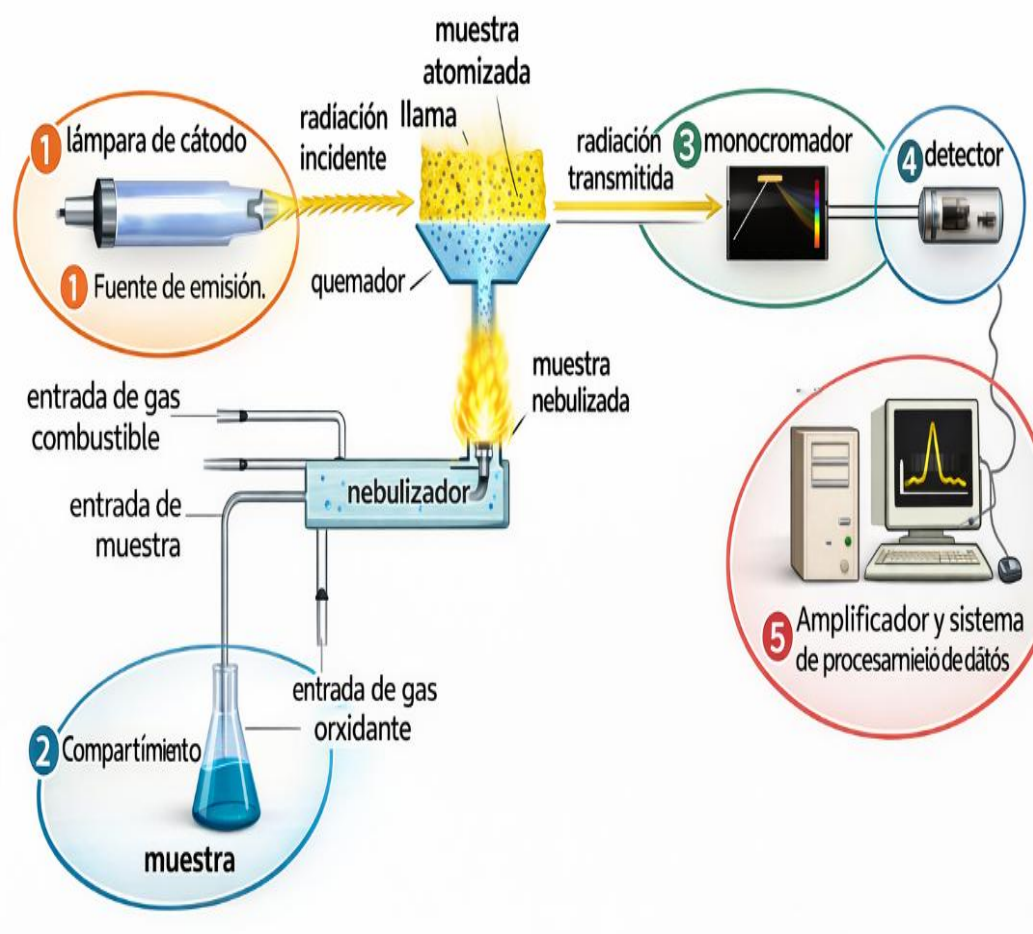


Figura 8: Esquema básico de un espectrómetro de absorción atómica con atomización en llama (AAS).

Nota. Elaborado por los Autores

### **2.13 Espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS)**

De manera complementaria, se empleó ICP-MS por su alta sensibilidad y capacidad multielemental. Las soluciones digeridas fueron nebulizadas para formar un aerosol fino que ingresó a un plasma de argón ( $>6000$  K), donde los elementos fueron atomizados e ionizados. Luego, los iones fueron extraídos hacia el sistema de vacío y separados según su relación masa/carga ( $m/z$ ) mediante un analizador (por ejemplo, cuadrupolo). La cuantificación se realizó con curvas de calibración elaboradas con estándares certificados y los resultados se reportaron en mg/kg de suelo seco.



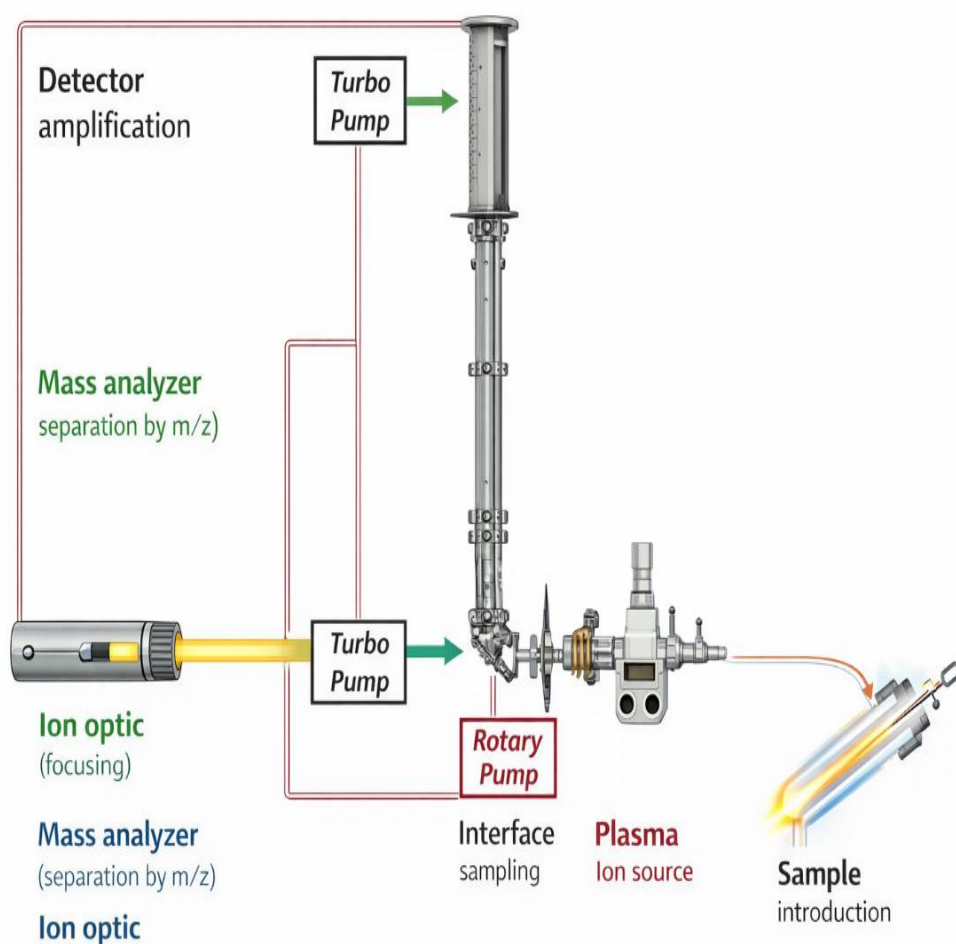


Figura 9: Diagrama ICP-MS.

Nota. Elaborado por los Autores

## 2.14 Método de atomización

El método de atomización se seleccionó según el rango de concentración esperado y la sensibilidad requerida. En este estudio se utilizó principalmente atomización en llama aire-acetileno, adecuada para concentraciones en el orden de mg/kg, debido a su robustez, rapidez y buen desempeño en matrices ambientales.

## 2.15 Control de calidad analítica

Se implementó control de calidad para garantizar precisión y exactitud. Se trabajó con blancos de reactivos sometidos al mismo procedimiento de digestión,

y con curvas de calibración de estándares certificados, evaluando la linealidad mediante  $R^2$ . Se estimaron límites de detección (LOD) y cuantificación (LOQ) a partir de la desviación estándar del blanco ( $3\sigma$  y  $10\sigma$ ). La precisión se verificó con lecturas por triplicado y %RSD; la exactitud se evaluó con ensayos de recuperación mediante fortificación.

## **2.16 Análisis estadístico**

Los datos obtenidos de las concentraciones de metales pesados fueron organizados y procesados mediante estadística descriptiva, calculándose medidas de tendencia central y dispersión, tales como media aritmética y desviación estándar. Para evaluar diferencias significativas entre los puntos de muestreo y cantones analizados, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de significancia de  $\alpha = 0,05$ . Cuando se identificaron diferencias significativas, se empleó una prueba de comparación múltiple (DMS) para determinar la separación estadística entre medias. El análisis estadístico permitió interpretar la variabilidad espacial de las concentraciones metálicas y su posible asociación con factores agroecológicos. Estos procedimientos se fundamentan en los principios de la estadística aplicada a la investigación experimental

## **2.17 Criterios normativos de referencia**

Como se presenta en la Tabla 2, los valores guía normativos para metales pesados en suelos agrícolas establecen rangos de referencia que permiten evaluar la magnitud de las concentraciones determinadas en las muestras analizadas. Estos límites constituyen el marco técnico utilizado para contrastar los resultados obtenidos mediante AAS e ICP-MS, facilitando la clasificación de los niveles detectados en función de su conformidad con la normativa ambiental vigente y con estándares internacionales.

*Tabla 2: Valores guía normativos referenciales para metales pesados en suelos agrícolas (mg/kg).*

| <b>c</b>         | <b>Ecuador<br/>(AM 097-A)*</b> | <b>FAO/OMS<br/>(referencial)</b> | <b>USEPA (screening<br/>level referencial)</b> | <b>Observación técnica</b>              |
|------------------|--------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Cadmio (Cd)      | 0,5 – 1,0                      | 0,5 – 1,5                        | 0,4 – 1,2                                      | Alta toxicidad y movilidad en pH ácido  |
| Plomo (Pb)       | 70 – 100                       | 50 – 100                         | 80 – 120                                       | Baja movilidad, alta persistencia       |
| Arsénico (As)    | 12 – 20                        | 10 – 20                          | 0,7 – 20                                       | Alta toxicidad; depende de especiación  |
| Mercurio (Hg)    | 0,5 – 1,0                      | 0,5 – 1,0                        | 0,3 – 1,0                                      | Alta bioacumulación                     |
| Cromo total (Cr) | 100 – 150                      | 100                              | 120 – 230                                      | Toxicidad depende de Cr (III) o Cr (VI) |
| Níquel (Ni)      | 40 – 75                        | 30 – 75                          | 50 – 160                                       | Movilidad moderada                      |
| Cobre (Cu)       | 100 – 150                      | 60 – 140                         | 100 – 200                                      | Micronutriente esencial                 |
| Zinc (Zn)        | 200 – 300                      | 200 – 300                        | 300                                            | Micronutriente; baja toxicidad relativa |

*Nota. Elaborado por los Autores*

Por lo tanto, la comparación sistemática de los valores experimentales con los criterios de referencia que se muestran en la Tabla 2 permite detectar excedencias, interpretarlas en términos ambientales y definir un análisis de riesgo potencial en los sistemas agrícolas bajo influencia volcánica. Este proceso refuerza la coherencia metodológica del estudio, conectando la evidencia analítica con criterios normativos objetivos que apoyen la evaluación ambiental de los capítulos siguientes.

## **2.18 Evaluación de impacto ambiental**

La evaluación de impacto ambiental se abordó como una etapa integradora para interpretar los resultados geoquímicos en términos de sus potenciales efectos ecológicos y productivos en agroecosistemas volcánicos. Este estudio no sólo se enfocó en la cuantificación de concentraciones metálicas, sino que abarcó la interacción entre deposición de ceniza, características fisicoquímicas del suelo y su posible transferencia a biomasa vegetal.

La evaluación se realizó integrando tres enfoques: (i) comparación de concentraciones con criterios normativos de referencia; (ii) análisis de factores edáficos que controlan la movilidad y biodisponibilidad (pH, materia orgánica, conductividad eléctrica y capacidad de intercambio catiónico); y (iii) evaluación de la posible transferencia suelo-planta y su entrada en la cadena alimentaria. Esta metodología posibilitó la determinación de una lectura ambiental contextualizada, definiendo escenarios de bajo, medio o potencial riesgo.

Para sistematizar la identificación y priorización de impactos, se utilizó la matriz de Leopold como herramienta metodológica para asociar las acciones generadas por la deposición volcánica con los componentes ambientales susceptibles a ser afectados. La magnitud e importancia de cada interacción fueron valoradas cualitativamente para estimar el nivel de impacto y justificar la interpretación ambiental en el marco técnico del estudio.

### **2.18.1 Aplicación de la Matriz de Leopold**

La Matriz de Leopold se empleó como instrumento metodológico para identificar y valorar los impactos ambientales derivados de la deposición de ceniza volcánica y la presencia de metales pesados en suelos agrícolas. Su aplicación permitió relacionar de manera sistemática las acciones generadoras de impacto con los componentes ambientales susceptibles de afectación, facilitando una evaluación integral del sistema.

Con el fin de incorporar las particularidades edafológicas, productivas y socioambientales de cada territorio, se elaboró una matriz independiente por cada cantón analizado. Este enfoque evitó generalizaciones y permitió una interpretación diferenciada de los efectos ambientales en función del contexto local.

Las acciones consideradas incluyeron la deposición de ceniza, la acumulación y movilización de metales en el suelo, los procesos de lixiviación asociados a la precipitación y la absorción por cultivos agrícolas. Estas se cruzaron

con factores ambientales tales como calidad y fertilidad del suelo, microbiota edáfica, calidad del agua, biomasa vegetal, fauna, actividad agrícola y salud humana indirecta.

Cada interacción fue evaluada mediante dos atributos: magnitud e importancia, definidos en una escala ordinal previamente establecida. La magnitud reflejó el grado de alteración del componente ambiental, mientras que la importancia consideró su relevancia ecológica y productiva en el cantón correspondiente. El valor del impacto se obtuvo del producto de ambos atributos, lo que permitió clasificarlo en niveles bajo, moderado o alto.

La aplicación diferenciada por cantón facilitó la comparación espacial de los impactos y la identificación de áreas con mayor vulnerabilidad, fortaleciendo la integración entre los resultados químicos obtenidos y su interpretación ambiental en el territorio.

## **2.19 Limitaciones del estudio**

El estudio tiene algunas limitaciones, propias del diseño metodológico y las condiciones del territorio analizado. Primero, su naturaleza experimental y transversal significa que los resultados reflejan una situación en un momento específico, sin permitir determinar tendencias temporales de acumulación o variación estacional de metales en el suelo. Además, la heterogeneidad inherente a los sistemas edáficos andinos puede introducir variaciones espaciales que, a pesar de la homogenización por medio de muestras compuestas, no pueden ser totalmente controladas.

Además, la evaluación de los resultados se basa en valores guía normativos y parámetros fisicoquímicos medidos en el momento del muestreo, pero sin incluir análisis secuenciales de fraccionamiento químico o isotópico que permitan diferenciar entre fuentes naturales y antrópicas. Sin embargo, las técnicas analíticas utilizadas, sumado al control de calidad aplicado, aseguran la fiabilidad en la cuantificación y robustez en la interpretación ambiental.

## **2.20 Modelo conceptual del estudio**

El modelo conceptual de la investigación se basa en la interacción entre deposición de ceniza volcánica, características fisicoquímicas del suelo y movilización de metales pesados en agroecosistemas andinos. Este modelo propone que la ceniza volcánica es una fuente potencial de elementos traza que, al depositarse en el suelo, cambian su geoquímica y afectan los procesos de adsorción, complejación y movilidad.

En este contexto, las características edáficas como el pH, la materia orgánica, la conductividad eléctrica y la capacidad de intercambio catiónico son factores moduladores que definen la retención o movilización de metales y su posible transferencia a biomasa vegetal. El modelo entonces incorpora una relación de causa-efecto entre exposición volcánica (variable independiente), dinámica de metales en suelo (variable dependiente) y transferencia suelo-planta, modulada por factores agroecológicos y productivos.

Esta manera de abordarlo lo convierte en un fenómeno sistémico, en el que se integran procesos geoquímicos, ambientales y productivos, que dan soporte a la hipótesis y permiten discutir los resultados en el capítulo posterior.



## CAPÍTULO III

### III. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LA DINÁMICA GEOQUÍMICA EN SUELOS AGRÍCOLAS

La dinámica geoquímica de los suelos agrícolas fue evaluada en los cantones de Guamote, Riobamba, Alausí y Chunchi, considerando su exposición diferencial a la deposición de ceniza volcánica y sus características edafoclimáticas particulares. El análisis integró parámetros fisicoquímicos, contenido de macro y micronutrientes, así como concentraciones de metales pesados determinadas mediante espectroscopía de absorción atómica, permitiendo establecer patrones espaciales de comportamiento geoquímico.

La incorporación de los cuatro cantones responde a la necesidad de comprender la variabilidad territorial del impacto volcánico, evitando generalizaciones y permitiendo identificar diferencias asociadas a altitud, uso del suelo, intensidad de afectación y prácticas agrícolas locales.

#### 3.1 Caracterización fisicoquímica comparativa por cantón

La caracterización fisicoquímica de los suelos agrícolas evaluados evidenció variabilidad entre los cantones Alausí–Chunchi, Riobamba y Guamote. El pH registró valores ligeramente ácidos a neutros en Alausí–Chunchi (6,05–7,52;  $\approx 6,83$ ) y Guamote (6,18–8,59;  $\approx 6,91$ ), mientras que Riobamba presentó valores predominantemente alcalinos (7,73–8,62;  $\approx 8,19$ ). La conductividad eléctrica mostró el mayor rango en Alausí–Chunchi (32–282  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), seguida de Guamote (63–226  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) y Riobamba (108–203  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). El contenido de materia orgánica evidenció mayor amplitud en Alausí–Chunchi (1,16–14,48 %), en comparación con Riobamba (2,38–7,18 %) y Guamote (1,67–6,26 %). En cuanto a la capacidad de intercambio catiónico, Riobamba registró el rango más elevado (10–73), mientras que Alausí–Chunchi (12–45) y Guamote (12–29) presentaron valores intermedios. Respecto a la textura, predominó la clase franco arenosa en Guamote,



franco arenoso y arenoso en Alausí–Chunchi, y franco a franco limoso en Riobamba. El análisis de varianza indicó diferencias estadísticamente significativas entre cantones para los parámetros evaluados.

*Tabla 3: Comparación fisicoquímica inter-cantonal de suelos agrícolas bajo influencia volcánica.*

| <b>Parámetro</b>               | <b>Alausí–Chunchi</b>        | <b>Riobamba</b>              | <b>Guamote</b>               |
|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| pH                             | 6,05–7,52 ( $\approx 6,83$ ) | 7,73–8,62 ( $\approx 8,19$ ) | 6,18–8,59 ( $\approx 6,91$ ) |
| CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) | 32–282                       | 108–203                      | 63–226                       |
| MO (%)                         | 1,16–14,48                   | 2,38–7,18                    | 1,67–6,26                    |
| CIC                            | 12–45                        | 10–73                        | 12–29                        |
| Textura dominante              | Franco arenoso / arenoso     | Franco / franco limoso       | Franco arenoso               |

*Nota. Elaborado por los Autores*

Estos, valores presentados en la tabla 3 evidencian diferencias cuantitativas en los parámetros fisicoquímicos entre los cantones analizados, confirmando variabilidad espacial en las propiedades edáficas evaluadas. Estos resultados constituyen la base descriptiva para el análisis posterior de la dinámica geoquímica de los metales pesados.

### **3.1.1 Variabilidad del pH por cantón**

La Tabla 4 presenta los estadísticos descriptivos del pH en los suelos agrícolas evaluados por cantón. Riobamba registró la media más elevada ( $8,19 \pm 0,36$ ), con valores comprendidos entre 7,73 y 8,62, evidenciando menor dispersión relativa respecto a los otros cantones. Guamote presentó una media de  $6,89 \pm 0,61$ , con un rango más amplio (6,18–8,59), reflejando mayor variabilidad interna. Por su parte, Alausí–Chunchi registró una media de  $6,85 \pm 0,49$  y valores entre 6,05 y 7,52.

El análisis de varianza (ANOVA) evidenció diferencias estadísticamente significativas entre cantones ( $F(2,37) = 24,80$ ;  $p < 0,001$ ). La comparación múltiple mediante la prueba de Tukey indicó que Riobamba difiere

significativamente de Guamote y Alausí–Chunchi, mientras que estos dos últimos no presentan diferencias significativas entre sí.

*Tabla 4: Estadísticos descriptivos y análisis de varianza del pH por cantón.*

| <b>Cantón</b>  | <b>n</b> | <b>Media ± DE</b> | <b>Mínimo</b> | <b>Máximo</b> |
|----------------|----------|-------------------|---------------|---------------|
| Riobamba       | 10       | 8,19 ± 0,36a      | 7,73          | 8,62          |
| Guamote        | 15       | 6,89 ± 0,61b      | 6,18          | 8,59          |
| Alausí–Chunchi | 15       | 6,85 ± 0,49b      | 6,05          | 7,52          |

*Nota:* Media ± desviación estándar (DE). Letras diferentes dentro de la columna indican diferencias estadísticamente significativas entre cantones según prueba de Tukey ( $\alpha = 0,05$ )

Nota. Elaborado por los Autores

### **3.1.2 Conductividad eléctrica**

La Tabla 5 presenta los estadísticos descriptivos de la conductividad eléctrica (CE) en los suelos agrícolas evaluados por cantón. Riobamba registró la media más elevada ( $145,38 \pm 28,02 \mu\text{S/cm}$ ), con valores comprendidos entre 108,00 y 203,00  $\mu\text{S/cm}$ , mostrando una dispersión moderada. Alausí–Chunchi presentó una media de  $124,62 \pm 82,17 \mu\text{S/cm}$ , con el rango más amplio del estudio (32,46–282,00  $\mu\text{S/cm}$ ), lo que evidencia alta variabilidad interna entre los puntos de muestreo. Guamote mostró una media de  $115,22 \pm 55,40 \mu\text{S/cm}$  y valores entre 63,16 y 226,66  $\mu\text{S/cm}$ , reflejando una variabilidad intermedia en comparación con los otros cantones.

*Tabla 5: Estadísticos descriptivos y ANOVA para la Conductividad Eléctrica ( $\mu\text{S/cm}$ ).*

| <b>Cantón</b>  | <b>n</b> | <b>Media ± DE</b>    | <b>Mínimo</b> | <b>Máximo</b> |
|----------------|----------|----------------------|---------------|---------------|
| Riobamba       | 10       | $145,38 \pm 28,02^a$ | 108,00        | 203,00        |
| Alausí–Chunchi | 15       | $124,62 \pm 82,17^a$ | 32,46         | 282,00        |
| Guamote        | 15       | $115,22 \pm 55,40^a$ | 63,16         | 226,66        |

*Nota:* Media ± desviación estándar (DE). Letras iguales dentro de la columna indican que no existen diferencias estadísticamente significativas entre cantones según prueba de Tukey ( $\alpha = 0,05$ )

Nota. Elaborado por los Autores

El análisis de varianza no evidenció diferencias estadísticamente significativas entre cantones ( $F(2,37) = 0,71$ ;  $p = 0,500$ ). Las letras iguales en la tabla confirman la ausencia de diferencias significativas según la prueba de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).

### 3.1.3 Materia orgánica

La Tabla 6 presenta los estadísticos descriptivos del contenido de materia orgánica (MO) en los suelos agrícolas evaluados por cantón. Alausí–Chunchi registró la media más elevada ( $5,88 \pm 3,60$  %), con un rango amplio comprendido entre 1,16 % y 14,48 %, evidenciando la mayor variabilidad interna entre los cantones. Riobamba presentó una media de  $3,81 \pm 1,34$  %, con valores entre 2,38 % y 7,18 %, mientras que Guamote mostró la media más baja ( $3,48 \pm 1,38$  %), con un rango de 1,67 % a 6,26 %.

*Tabla 6: Estadísticos descriptivos y ANOVA para la Materia Orgánica (%).*

| <b>Cantón</b>  | <b>n</b> | <b>Media <math>\pm</math> DE</b> | <b>Mínimo</b> | <b>Máximo</b> |
|----------------|----------|----------------------------------|---------------|---------------|
| Alausí–Chunchi | 15       | $5,88 \pm 3,60^a$                | 1,16          | 14,48         |
| Riobamba       | 10       | $3,81 \pm 1,34^{ab}$             | 2,38          | 7,18          |
| Guamote        | 15       | $3,48 \pm 1,38^b$                | 1,67          | 6,26          |

*Nota: Media  $\pm$  desviación estándar (DE). Letras diferentes dentro de la columna indican diferencias estadísticamente significativas entre cantones según prueba de Tukey ( $\alpha = 0,05$ )*

*Nota. Elaborado por los Autores*

El análisis de varianza indicó diferencias estadísticamente significativas entre cantones ( $F(2,37) = 4,03$ ;  $p = 0,026$ ). La prueba de Tukey mostró que Alausí–Chunchi difiere significativamente de Guamote (letras diferentes), mientras que Riobamba no presentó diferencias significativas respecto a los otros dos cantones, ubicándose en un grupo intermedio (ab).

### 3.1.4 Capacidad de intercambio catiónico

La Tabla 7 presenta los estadísticos descriptivos de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) en los suelos agrícolas evaluados por cantón. Alausí–Chunchi registró la media más elevada ( $27,45 \pm 10,06$ ), con valores comprendidos entre 12,00 y 45,00. Riobamba presentó una media de  $24,75 \pm 17,98$ , evidenciando el rango más amplio del estudio (10,00–73,40), lo que refleja una alta dispersión interna. Guamote mostró la media más baja ( $17,97 \pm 3,90$ ), con valores entre 12,59 y 29,00, y menor variabilidad relativa en comparación con los otros cantones.

*Tabla 7: Estadísticos descriptivos y ANOVA para la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC).*

| <b>Cantón</b>  | <b>n</b> | <b>Media ± DE</b>          | <b>Mínimo</b> | <b>Máximo</b> |
|----------------|----------|----------------------------|---------------|---------------|
| Alausí–Chunchi | 15       | 27,45 ± 10,06 <sup>a</sup> | 12,00         | 45,00         |
| Riobamba       | 10       | 24,75 ± 17,98 <sup>a</sup> | 10,00         | 73,40         |
| Guamote        | 15       | 17,97 ± 3,90 <sup>a</sup>  | 12,59         | 29,00         |

*Nota: Media ± desviación estándar (DE). Letras iguales dentro de la columna indican que no existen diferencias estadísticamente significativas entre cantones según prueba de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).*

*Nota. Elaborado por los Autores*

El análisis de varianza no evidenció diferencias estadísticamente significativas entre cantones ( $F(2,37) = 2,87$ ;  $p = 0,069$ ). La prueba de Tukey confirmó la ausencia de diferencias significativas, razón por la cual todos los cantones comparten la misma letra superíndice.

### **3.1.5 Densidad real**

La Tabla 8 presenta los estadísticos descriptivos de la densidad real en los suelos agrícolas evaluados por cantón. Guamote registró la media más elevada ( $2,69 \pm 0,11 \text{ g/cm}^3$ ), con valores comprendidos entre 2,48 y  $2,85 \text{ g/cm}^3$ , evidenciando baja dispersión interna. Alausí–Chunchi presentó una media de  $2,38 \pm 0,18 \text{ g/cm}^3$ , con un rango más amplio ( $1,89\text{--}2,71 \text{ g/cm}^3$ ), mientras que Riobamba mostró la media más baja ( $2,29 \pm 0,15 \text{ g/cm}^3$ ), con valores entre 2,03 y  $2,45 \text{ g/cm}^3$ .

*Tabla 8: Estadísticos descriptivos y ANOVA para la Densidad Real ( $\text{g/cm}^3$ ).*

| <b>Cantón</b>  | <b>n</b> | <b>Media ± DE</b> | <b>Mínimo</b> | <b>Máximo</b> |
|----------------|----------|-------------------|---------------|---------------|
| Guamote        | 15       | $2,69 \pm 0,11^a$ | 2,48          | 2,85          |
| Alausí–Chunchi | 15       | $2,38 \pm 0,18^b$ | 1,89          | 2,71          |
| Riobamba       | 10       | $2,29 \pm 0,15^b$ | 2,03          | 2,45          |

*Nota: Media ± desviación estándar (DE). Letras diferentes dentro de la columna indican diferencias estadísticamente significativas entre cantones según prueba de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).*

*Nota. Elaborado por los Autores*

El análisis de varianza evidenció diferencias estadísticamente significativas entre cantones ( $F(2,37) = 25,59$ ;  $p < 0,001$ ). La prueba de Tukey indicó que Guamote difiere significativamente de Alausí–Chunchi y Riobamba (letras diferentes), mientras que estos dos últimos no presentan diferencias significativas entre sí.

### 3.1.6 Densidad aparente

La Tabla 9 presenta los estadísticos descriptivos de la densidad aparente en los suelos agrícolas evaluados por cantón. Guamote registró la media más elevada ( $1,29 \pm 0,08 \text{ g/cm}^3$ ), con valores comprendidos entre 1,13 y  $1,42 \text{ g/cm}^3$ , mostrando baja variabilidad interna. Riobamba presentó una media intermedia ( $1,22 \pm 0,04 \text{ g/cm}^3$ ), con un rango estrecho entre 1,17 y  $1,28 \text{ g/cm}^3$ . Por su parte, Alausí–Chunchi registró la media más baja ( $1,09 \pm 0,16 \text{ g/cm}^3$ ), con valores entre 0,83 y  $1,36 \text{ g/cm}^3$ , evidenciando mayor dispersión relativa en comparación con los otros cantones.

*Tabla 9: Estadísticos descriptivos y ANOVA para la Densidad Aparente ( $\text{g/cm}^3$ ).*

| Cantón         | n  | Media $\pm$ DE       | Mínimo | Máximo |
|----------------|----|----------------------|--------|--------|
| Guamote        | 15 | $1,29 \pm 0,08^a$    | 1,13   | 1,42   |
| Riobamba       | 10 | $1,22 \pm 0,04^{ab}$ | 1,17   | 1,28   |
| Alausí–Chunchi | 15 | $1,09 \pm 0,16^b$    | 0,83   | 1,36   |

*Nota: Media  $\pm$  desviación estándar (DE). Letras diferentes dentro de la columna indican diferencias estadísticamente significativas entre cantones según prueba de Tukey ( $\alpha = 0,05$ )*

El análisis de varianza evidenció diferencias estadísticamente significativas entre cantones ( $F(2,37) = 12,22$ ;  $p < 0,001$ ). La prueba de Tukey indicó que Guamote difiere significativamente de Alausí–Chunchi (letras diferentes), mientras que Riobamba no presentó diferencias significativas respecto a los otros dos cantones, ubicándose en un grupo intermedio (ab).

### 3.2 Macronutrientes y elementos intercambiables

La Tabla 10 presenta los estadísticos descriptivos de carbono (C), nitrógeno (N), relación C/N, fósforo (P), sodio (Na) y potasio (K) en los suelos agrícolas evaluados en los tres cantones estudiados. El contenido de carbono mostró su mayor promedio en Alausí–Chunchi ( $2,36 \pm 1,49 \%$ ), seguido de Guamote ( $0,94 \pm 0,61 \%$ ), mientras que Riobamba registró los valores más bajos ( $0,034 \pm 0,01 \%$ ). En contraste, el nitrógeno presentó su media más elevada en Riobamba ( $1,30 \pm 0,42 \%$ ), superando ampliamente a Alausí–Chunchi ( $0,025 \pm 0,02 \%$ ) y Guamote ( $0,021 \pm 0,01 \%$ ). La relación C/N evidenció el mayor promedio y la mayor

dispersión en Alausí–Chunchi ( $154,01 \pm 159,12$ ), seguida de Guamote ( $53,76 \pm 50,62$ ) y Riobamba ( $43,66 \pm 25,07$ ). En cuanto al fósforo disponible, Riobamba presentó el valor promedio más alto ( $222,73 \pm 97,69$  ppm), seguido de Alausí–Chunchi ( $188,07 \pm 126,63$  ppm), mientras que Guamote mostró el menor promedio ( $55,22 \pm 18,36$  ppm).

*Tabla 10: Estadísticos descriptivos de macronutrientes y elementos intercambiables por cantón.*

| <b>Cantón</b>  | <b>n</b> | <b>C (%)</b>     | <b>N (%)</b>     | <b>C/N</b>          | <b>P (ppm)</b>      | <b>Na (ppm)</b>      | <b>K (ppm)</b>       |
|----------------|----------|------------------|------------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| Alausí–Chunchi | 15       | $2,36 \pm 1,49$  | $0,025 \pm 0,02$ | $154,01 \pm 159,12$ | $188,07 \pm 126,63$ | $584,37 \pm 210,99$  | $291,35 \pm 158,79$  |
| Riobamba       | 10       | $0,034 \pm 0,01$ | $1,30 \pm 0,42$  | $43,66 \pm 25,07$   | $222,73 \pm 97,69$  | $2384,86 \pm 460,90$ | $1736,68 \pm 410,45$ |
| Guamote        | 15       | $0,94 \pm 0,61$  | $0,021 \pm 0,01$ | $53,76 \pm 50,62$   | $55,22 \pm 18,36$   | $54,27 \pm 9,02$     | $27,01 \pm 14,51$    |

*Nota: Valores expresados como media  $\pm$  desviación estándar; n = número de muestras por cantón; Las diferencias significativas entre cantones deben confirmarse mediante ANOVA y prueba de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).*

*Nota. Elaborado por los Autores*

Respecto a los elementos intercambiables, el sodio alcanzó concentraciones marcadamente superiores en Riobamba ( $2384,86 \pm 460,90$  ppm) en comparación con Alausí–Chunchi ( $584,37 \pm 210,99$  ppm) y Guamote ( $54,27 \pm 9,02$  ppm). De forma similar, el potasio presentó su mayor media en Riobamba ( $1736,68 \pm 410,45$  ppm), seguido de Alausí–Chunchi ( $291,35 \pm 158,79$  ppm), mientras que Guamote registró los valores más bajos ( $27,01 \pm 14,51$  ppm). En conjunto, los datos muestran variaciones cuantitativas diferenciadas entre cantones para los macronutrientes y elementos intercambiables evaluados.

### **3.2.1 Carbono**

La Tabla 11 presenta los estadísticos descriptivos del contenido de carbono (%) en los suelos agrícolas evaluados en los tres cantones estudiados, así como la comparación múltiple entre medias. Alausí–Chunchi registró el mayor valor promedio ( $2,36 \pm 1,49$  %), con un rango que osciló entre 0,45 y 5,83 %, evidenciando además la mayor dispersión de los datos, reflejada en su desviación estándar. Guamote presentó un promedio significativamente menor ( $0,94 \pm 0,61$

%), con valores comprendidos entre 0,19 y 2,34 %, mostrando una variabilidad intermedia en comparación con los otros cantones. Riobamba registró el contenido más bajo de carbono ( $0,034 \pm 0,01$  %), con un rango estrecho entre 0,02 y 0,05 %, lo que indica una baja variabilidad interna en las muestras analizadas.

*Tabla 11: Estadísticos descriptivos y comparación múltiple para Carbono (%).*

| <b>Cantón</b>  | <b>n</b> | <b>Media <math>\pm</math> DE</b> | <b>Mínimo</b> | <b>Máximo</b> |
|----------------|----------|----------------------------------|---------------|---------------|
| Alausí–Chunchi | 15       | $2,36 \pm 1,49^a$                | 0,45          | 5,83          |
| Guamote        | 15       | $0,94 \pm 0,61^b$                | 0,19          | 2,34          |
| Riobamba       | 10       | $0,034 \pm 0,01^c$               | 0,02          | 0,05          |

*Nota: Media  $\pm$  desviación estándar (DE). Letras diferentes en la columna indican diferencias estadísticamente significativas entre cantones según prueba de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).*

*Nota. Elaborado por los Autores*

La comparación múltiple mediante la prueba de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ) evidenció diferencias estadísticamente significativas entre los tres cantones, conformando grupos independientes (a, b y c), lo que confirma la existencia de contrastes cuantitativos en el contenido de carbono entre las unidades territoriales evaluadas.

### **3.2.2 Nitrógeno**

La Tabla 12 presenta los estadísticos descriptivos del contenido de nitrógeno (%) en los suelos agrícolas evaluados, junto con la comparación múltiple entre cantones. Riobamba registró el mayor valor promedio ( $1,30 \pm 0,42$  %), con un rango comprendido entre 0,71 y 1,95 %, evidenciando una variabilidad moderada dentro de las muestras analizadas. En contraste, Alausí–Chunchi presentó un promedio considerablemente menor ( $0,025 \pm 0,02$  %), con valores entre 0,01 y 0,06 %, mientras que Guamote mostró una media similar ( $0,021 \pm 0,01$  %), con un rango de 0,01 a 0,04 %.

*Tabla 12: Estadísticos descriptivos y comparación múltiple para Nitrógeno (%).*

| <b>Cantón</b>  | <b>n</b> | <b>Media <math>\pm</math> DE</b> | <b>Mínimo</b> | <b>Máximo</b> |
|----------------|----------|----------------------------------|---------------|---------------|
| Riobamba       | 10       | $1,30 \pm 0,42^a$                | 0,71          | 1,95          |
| Alausí–Chunchi | 15       | $0,025 \pm 0,02^b$               | 0,01          | 0,06          |
| Guamote        | 15       | $0,021 \pm 0,01^b$               | 0,01          | 0,04          |

*Nota: Media  $\pm$  desviación estándar (DE). Letras diferentes en la columna indican diferencias estadísticamente significativas entre cantones según prueba de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).*

*Nota. Elaborado por los Autores*

La comparación múltiple mediante la prueba de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ) indicó que Riobamba difiere estadísticamente de los otros dos cantones, conformando un grupo independiente (a), mientras que Alausí–Chunchi y Guamote no presentan diferencias significativas entre sí (b). Estos resultados evidencian una distribución heterogénea del nitrógeno entre las unidades territoriales evaluadas.

### 3.2.3 Relación C/N

La Tabla 13 presenta los estadísticos descriptivos de la relación carbono/nitrógeno (C/N) en los suelos agrícolas evaluados por cantón, así como la comparación múltiple entre medias. Alausí–Chunchi registró el mayor promedio ( $154,01 \pm 159,12$ ), con un rango amplio entre 24,08 y 643,70, evidenciando la mayor dispersión de los datos entre los cantones analizados. Guamote presentó un promedio intermedio ( $53,76 \pm 50,62$ ), con valores comprendidos entre 9,50 y 214,28, mientras que Riobamba mostró la media más baja ( $43,66 \pm 25,07$ ), con un rango de 14,93 a 89,66.

*Tabla 13: Estadísticos descriptivos y comparación múltiple para la Relación C/N.*

| <b>Cantón</b>  | <b>n</b> | <b>Media <math>\pm</math> DE</b> | <b>Mínimo</b> | <b>Máximo</b> |
|----------------|----------|----------------------------------|---------------|---------------|
| Alausí–Chunchi | 15       | $154,01 \pm 159,12^a$            | 24,08         | 643,70        |
| Guamote        | 15       | $53,76 \pm 50,62^b$              | 9,50          | 214,28        |
| Riobamba       | 10       | $43,66 \pm 25,07^b$              | 14,93         | 89,66         |

*Nota: Media  $\pm$  desviación estándar (DE). Letras diferentes en la columna indican diferencias estadísticamente significativas entre cantones según prueba de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).*

*Nota. Elaborado por los Autores*

La comparación múltiple mediante la prueba de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ) indicó que Alausí–Chunchi difiere estadísticamente de Guamote y Riobamba, conformando un grupo independiente (a), mientras que estos dos últimos no presentan diferencias significativas entre sí (b). Asimismo, la desviación estándar observada en Alausí–Chunchi refleja una mayor variabilidad interna en comparación con los otros cantones.



### 3.2.4 Fósforo disponible

La Tabla 14 presenta los estadísticos descriptivos del fósforo disponible (ppm) en los suelos agrícolas evaluados en los tres cantones estudiados, junto con la comparación múltiple entre medias. Riobamba registró el mayor valor promedio ( $222,73 \pm 97,69$  ppm), con un rango de variación comprendido entre 79,69 y 412,80 ppm, evidenciando una dispersión moderada de los datos. Alausí–Chunchi presentó un promedio ligeramente inferior ( $188,07 \pm 126,63$  ppm), aunque con un rango más amplio (55,36–446,54 ppm), lo que refleja una mayor variabilidad interna en comparación con Riobamba. Por su parte, Guamote mostró el promedio más bajo ( $55,22 \pm 18,36$  ppm), con valores entre 31,23 y 91,83 ppm, registrando además la menor dispersión relativa entre los cantones evaluados.

*Tabla 14: Estadísticos descriptivos y comparación múltiple para Fósforo (ppm).*

| Cantón         | n  | Media $\pm$ DE        | Mínimo | Máximo |
|----------------|----|-----------------------|--------|--------|
| Riobamba       | 10 | $222,73 \pm 97,69^a$  | 79,69  | 412,80 |
| Alausí–Chunchi | 15 | $188,07 \pm 126,63^a$ | 55,36  | 446,54 |
| Guamote        | 15 | $55,22 \pm 18,36^b$   | 31,23  | 91,83  |

*Nota:* Media  $\pm$  desviación estándar (DE). Letras diferentes indican diferencias significativas según Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).

*Nota.* Elaborado por los Autores

La comparación múltiple mediante la prueba de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ) indicó que Riobamba y Alausí–Chunchi no presentan diferencias estadísticamente significativas entre sí, conformando un mismo grupo (a), mientras que Guamote difiere significativamente de ambos, ubicándose en un grupo independiente (b). Estos resultados evidencian contrastes cuantitativos en el contenido de fósforo entre los cantones evaluados.

### 3.2.5 Sodio

La Tabla 15 presenta los estadísticos descriptivos del sodio (ppm) en los suelos agrícolas evaluados por cantón, así como la comparación múltiple entre medias. Riobamba registró el mayor valor promedio ( $2384,86 \pm 460,90$  ppm), con un rango comprendido entre 1752,72 y 3046,52 ppm, evidenciando además una

dispersión moderada en sus valores. Alausí–Chunchi presentó un promedio significativamente menor ( $584,37 \pm 210,99$  ppm), con valores que oscilaron entre 184,95 y 977,33 ppm, mostrando una variabilidad interna considerable. Guamote registró el promedio más bajo ( $54,27 \pm 9,02$  ppm), con un rango estrecho entre 37,61 y 67,48 ppm, lo que indica una menor dispersión relativa en comparación con los otros cantones

*Tabla 15: Estadísticos descriptivos y comparación múltiple para Sodio (ppm).*

| <b>Cantón</b>  | <b>n</b> | <b>Media <math>\pm</math> DE</b> | <b>Mínimo</b> | <b>Máximo</b> |
|----------------|----------|----------------------------------|---------------|---------------|
| Riobamba       | 10       | $2384,86 \pm 460,90^a$           | 1752,72       | 3046,52       |
| Alausí–Chunchi | 15       | $584,37 \pm 210,99^b$            | 184,95        | 977,33        |
| Guamote        | 15       | $54,27 \pm 9,02^c$               | 37,61         | 67,48         |

*Nota:* Media  $\pm$  desviación estándar (DE). Letras diferentes indican diferencias significativas según Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). *Nota.* Elaborado por los Autores

La prueba de comparación múltiple de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ) evidenció diferencias estadísticamente significativas entre los tres cantones, conformando grupos independientes (a, b y c), lo que confirma la existencia de contrastes cuantitativos marcados en las concentraciones de sodio entre las unidades territoriales evaluadas.

### **3.2.6 Potasio**

La Tabla 16 presenta los estadísticos descriptivos del potasio (ppm) en los suelos agrícolas evaluados en los tres cantones estudiados, junto con la comparación múltiple entre medias. Riobamba registró el mayor valor promedio ( $1736,68 \pm 410,45$  ppm), con un rango de variación comprendido entre 1018,04 y 2265,36 ppm, evidenciando una dispersión moderada de los datos. Alausí–Chunchi presentó un promedio considerablemente menor ( $291,35 \pm 158,79$  ppm), con valores que oscilaron entre 82,49 y 612,38 ppm, mostrando una variabilidad interna apreciable. Por su parte, Guamote registró el promedio más bajo ( $27,01 \pm 14,51$  ppm), con un rango entre 10,96 y 61,61 ppm, reflejando la menor dispersión relativa entre los cantones evaluados.

*Tabla 16: Estadísticos descriptivos y comparación múltiple para Potasio (ppm).*

| <b>Cantón</b>  | <b>n</b> | <b>Media ± DE</b>             | <b>Mínimo</b> | <b>Máximo</b> |
|----------------|----------|-------------------------------|---------------|---------------|
| Riobamba       | 10       | 1736,68 ± 410,45 <sup>a</sup> | 1018,04       | 2265,36       |
| Alausí–Chunchi | 15       | 291,35 ± 158,79 <sup>b</sup>  | 82,49         | 612,38        |
| Guamote        | 15       | 27,01 ± 14,51 <sup>c</sup>    | 10,96         | 61,61         |

*Nota:* Media ± desviación estándar (DE). Letras diferentes indican diferencias significativas según Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). *Nota.* Elaborado por los Autores

La prueba de comparación múltiple de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ) evidenció diferencias estadísticamente significativas entre los tres cantones, conformando grupos independientes (a, b y c), lo que confirma la existencia de contrastes cuantitativos marcados en las concentraciones de potasio entre las unidades territoriales analizadas.

### **3.3 Micronutrientes del suelo**

En la Tabla 17 se presentan los estadísticos descriptivos de los micronutrientes Mn, Cu, Zn y Fe por cantón. Para manganeso (Mn), los valores medios más elevados se registraron en Alausí–Chunchi (2917,43 ± 1813,64 ppm), seguido por Riobamba (263,53 ± 67,63 ppm), mientras que Guamote presentó los valores más bajos (17,57 ± 3,07 ppm). Se observa una alta dispersión en Alausí–Chunchi, evidenciada por una desviación estándar considerablemente superior a la registrada en los otros cantones.

En el caso del cobre (Cu), Alausí–Chunchi presentó la mayor media (39,35 ± 14,30 ppm), seguido por Riobamba (34,29 ± 8,42 ppm) y Guamote (27,93 ± 11,88 ppm). La variabilidad fue moderada en los tres cantones, con mayor dispersión relativa en Alausí–Chunchi y Guamote.

Para zinc (Zn), Alausí–Chunchi registró nuevamente la media más alta (60,50 ± 31,16 ppm), seguido de Riobamba (44,11 ± 12,32 ppm) y Guamote (28,28 ± 6,07 ppm). La desviación estándar más elevada se observó en Alausí–Chunchi, indicando una mayor heterogeneidad en los contenidos de este elemento.

*Tabla 17: Estadísticos descriptivos de micronutrientes por cantón.*

| <b>Cantón</b> | <b>n</b> | <b>Mn (ppm)</b> | <b>Cu (ppm)</b> | <b>Zn (ppm)</b> | <b>Fe (ppm)</b> |
|---------------|----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Alausí–       | 15       | 2917,43 ±       | 39,35 ±         | 60,50 ±         | 22941,55 ±      |
| Chunchi       |          | 1813,64         | 14,30           | 31,16           | 9635,21         |
| Riobamba      | 10       | 263,53 ± 67,63  | 34,29 ±         | 44,11 ±         | 21216,96 ±      |
|               |          |                 | 8,42            | 12,32           | 4972,63         |
| Guamote       | 15       | 17,57 ± 3,07    | 27,93 ±         | 28,28 ±         | 47,49 ± 13,08   |
|               |          |                 | 11,88           | 6,07            |                 |

*Nota:* Valores expresados como media ± desviación estándar (DE); n = número de muestras por cantón. Las diferencias significativas entre cantones deben confirmarse mediante ANOVA y prueba de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).  
 Nota. Elaborado por los Autores

Respecto al hierro (Fe), los valores medios fueron similares entre Alausí–Chunchi (22941,55 ± 9635,21 ppm) y Riobamba (21216,96 ± 4972,63 ppm), mientras que Guamote presentó concentraciones marcadamente inferiores (47,49 ± 13,08 ppm). La dispersión fue particularmente alta en Alausí–Chunchi, como lo refleja su elevada desviación estándar.

En conjunto, los datos muestran diferencias notables en las magnitudes y niveles de variabilidad de los micronutrientes entre cantones, destacándose Alausí–Chunchi por presentar los valores medios más altos y mayor dispersión en la mayoría de los elementos evaluados.

### **3.3.1 Manganeso (Mn)**

La Tabla 18 presenta los estadísticos descriptivos del contenido de manganeso (Mn, ppm) en los suelos agrícolas evaluados por cantón, así como la comparación múltiple entre medias. Alausí–Chunchi registró el mayor valor promedio (2917,43 ± 1813,64 ppm), con un rango amplio comprendido entre 217,73 y 5798,31 ppm, evidenciando además la mayor dispersión de los datos, reflejada en su elevada desviación estándar. Riobamba presentó un promedio considerablemente inferior (263,53 ± 67,63 ppm), con valores que oscilaron entre 147,15 y 363,28 ppm, mostrando una variabilidad moderada en comparación con Alausí–Chunchi. Por su parte, Guamote registró el valor promedio más bajo (17,57 ± 3,07 ppm), con un rango estrecho entre 14,67 y 23,49 ppm, lo que indica una baja dispersión interna de las muestras analizadas.

*Tabla 18: Estadísticos descriptivos y comparación múltiple para Manganeso.*

| <b>Cantón</b>  | <b>n</b> | <b>Media ± DE</b>              | <b>Mínimo</b> | <b>Máximo</b> |
|----------------|----------|--------------------------------|---------------|---------------|
| Alausí–Chunchi | 15       | 2917,43 ± 1813,64 <sup>a</sup> | 217,73        | 5798,31       |
| Riobamba       | 10       | 263,53 ± 67,63 <sup>b</sup>    | 147,15        | 363,28        |
| Guamote        | 15       | 17,57 ± 3,07 <sup>c</sup>      | 14,67         | 23,49         |

*Nota:* Media ± desviación estándar (DE). Letras diferentes indican diferencias significativas según Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). *Nota.* Elaborado por los Autores

La comparación múltiple mediante la prueba de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ) evidenció diferencias estadísticamente significativas entre los tres cantones, conformando grupos independientes (<sup>a</sup>, <sup>b</sup> y <sup>c</sup>). Este resultado confirma la existencia de contrastes cuantitativos marcados en las concentraciones de manganeso entre las unidades territoriales evaluadas, con una gradiente descendente desde Alausí–Chunchi hacia Guamote.

### **3.3.2 Cobre (Cu)**

La Tabla 19 presenta los estadísticos descriptivos del contenido de cobre (Cu, ppm) en los suelos agrícolas evaluados por cantón, junto con la comparación múltiple entre medias. Alausí–Chunchi registró el mayor valor promedio ( $39,35 \pm 14,30$  ppm), con un rango de variación comprendido entre 7,83 y 62,40 ppm, evidenciando una dispersión moderada de los datos. Riobamba presentó un promedio ligeramente inferior ( $34,29 \pm 8,42$  ppm), con valores entre 20,71 y 46,07 ppm, mostrando una variabilidad relativamente menor en comparación con Alausí–Chunchi. Guamote registró el promedio más bajo ( $27,93 \pm 11,88$  ppm), con un rango amplio que osciló entre 0,57 y 42,68 ppm, lo que indica una dispersión interna apreciable dentro de este cantón.

*Tabla 19: Estadísticos descriptivos y comparación múltiple para Cobre.*

| <b>Cantón</b>  | <b>n</b> | <b>Media ± DE</b>          | <b>Mínimo</b> | <b>Máximo</b> |
|----------------|----------|----------------------------|---------------|---------------|
| Alausí–Chunchi | 15       | 39,35 ± 14,30 <sup>a</sup> | 7,83          | 62,40         |
| Riobamba       | 10       | 34,29 ± 8,42 <sup>a</sup>  | 20,71         | 46,07         |
| Guamote        | 15       | 27,93 ± 11,88 <sup>a</sup> | 0,57          | 42,68         |

*Nota:* No se evidencian diferencias estadísticamente significativas entre cantones ( $\alpha = 0,05$ ). *Nota.* Elaborado por los Autores

La prueba de comparación múltiple indicó que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los cantones evaluados ( $\alpha = 0,05$ ), conformando un mismo grupo estadístico (a). Estos resultados evidencian que, pese a las diferencias numéricas observadas en los promedios, las concentraciones de cobre no presentan variaciones significativas entre las unidades territoriales analizadas.

3.3.3 Zinc (Zn)

La Tabla 20 presenta los estadísticos descriptivos del contenido de zinc (Zn, ppm) en los suelos agrícolas evaluados por cantón, así como la comparación múltiple entre medias. Alausí–Chunchi registró el mayor valor promedio ( $60,50 \pm 31,16$  ppm), con un rango de variación comprendido entre 28,48 y 138,56 ppm, evidenciando además la mayor dispersión de los datos entre los cantones analizados. Riobamba presentó un promedio intermedio ( $44,11 \pm 12,32$  ppm), con valores que oscilaron entre 35,37 y 73,64 ppm, mostrando una variabilidad moderada. Por su parte, Guamote registró el promedio más bajo ( $28,28 \pm 6,07$  ppm), con un rango entre 19,12 y 39,47 ppm, reflejando una menor dispersión relativa en comparación con los otros cantones.

Tabla 20: Estadísticos descriptivos y comparación múltiple para Zinc

| Cantón         | n  | Media $\pm$ DE      | Mínimo | Máximo |
|----------------|----|---------------------|--------|--------|
| Alausí–Chunchi | 15 | $60,50 \pm 31,16^a$ | 28,48  | 138,56 |
| Riobamba       | 10 | $44,11 \pm 12,32^b$ | 35,37  | 73,64  |
| Guamote        | 15 | $28,28 \pm 6,07^c$  | 19,12  | 39,47  |

*Nota:* Letras diferentes indican diferencias significativas según Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). Nota. Elaborado por los Autores

La prueba de comparación múltiple mediante Tukey ( $\alpha = 0,05$ ) evidenció diferencias estadísticamente significativas entre los tres cantones, conformando grupos independientes (<sup>a</sup>, <sup>b</sup> y <sup>c</sup>). Estos resultados indican contrastes cuantitativos claramente diferenciados en las concentraciones de zinc entre las unidades territoriales evaluadas.

### 3.3.4 Hierro (Fe)

La Tabla 21 presenta los estadísticos descriptivos del contenido de hierro (Fe, ppm) en los suelos agrícolas evaluados por cantón, así como la comparación múltiple entre medias. Alausí–Chunchi registró el mayor valor promedio ( $22941,55 \pm 9635,21$  ppm), con un rango de variación amplio comprendido entre 10134,82 y 45400,75 ppm, evidenciando además una elevada dispersión interna reflejada en su desviación estándar. Riobamba presentó un promedio ligeramente inferior ( $21216,96 \pm 4972,63$  ppm), con valores que oscilaron entre 13797,53 y 29179,21 ppm, mostrando una variabilidad moderada en comparación con Alausí–Chunchi.

*Tabla 21: Estadísticos descriptivos y comparación múltiple para Hierro.*

| Cantón         | n  | Media $\pm$ DE           | Mínimo   | Máximo   |
|----------------|----|--------------------------|----------|----------|
| Alausí–Chunchi | 15 | $22941,55 \pm 9635,21^a$ | 10134,82 | 45400,75 |
| Riobamba       | 10 | $21216,96 \pm 4972,63^a$ | 13797,53 | 29179,21 |
| Guamote        | 15 | $47,49 \pm 13,08^b$      | 26,94    | 73,12    |

*Nota: Letras diferentes indican diferencias significativas según Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). Nota. Elaborado por los Autores*

En contraste, Guamote registró concentraciones considerablemente menores ( $47,49 \pm 13,08$  ppm), con un rango estrecho entre 26,94 y 73,12 ppm, lo que indica baja dispersión relativa dentro de este cantón.

La comparación múltiple mediante la prueba de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ) indicó que Alausí–Chunchi y Riobamba no presentan diferencias estadísticamente significativas entre sí, conformando un mismo grupo estadístico (<sup>a</sup>), mientras que Guamote difiere significativamente de ambos, ubicándose en un grupo independiente (<sup>b</sup>). Estos resultados evidencian contrastes cuantitativos marcados en las concentraciones de hierro entre las unidades territoriales evaluadas.

### 3.4 Metales pesados

La Tabla 22 presenta los estadísticos descriptivos de las concentraciones de cadmio (Cd), plomo (Pb), níquel (Ni), arsénico (As), selenio (Se) y mercurio (Hg)

en los suelos agrícolas evaluados en los cantones Alausí–Chunchi, Riobamba y Guamote.

El cadmio (Cd) registró concentraciones inferiores al límite de detección (<0,25 ppm) en la totalidad de las muestras analizadas en los tres cantones (n = 40), sin observarse valores cuantificables. De manera similar, el mercurio (Hg) presentó concentraciones inferiores a 0,05 ppm en todas las muestras evaluadas.

En el caso del plomo (Pb), Alausí–Chunchi mostró valores cuantificables con una media de  $6,60 \pm 1,40$  ppm, mientras que en Riobamba y Guamote las concentraciones se mantuvieron por debajo de 4 ppm en la mayoría de las muestras, predominando valores inferiores al límite de detección analítico.

El níquel (Ni) presentó concentraciones cuantificables en los tres cantones. Riobamba registró el mayor valor promedio ( $9,77 \pm 1,19$  ppm), seguido de Alausí–Chunchi ( $8,78 \pm 2,68$  ppm), mientras que Guamote presentó el promedio más bajo ( $5,47 \pm 1,20$  ppm). La variabilidad fue mayor en Alausí–Chunchi, evidenciada por su desviación estándar superior en comparación con los otros cantones.

*Tabla 22: Estadísticos descriptivos de metales pesados por cantón.*

| Cantón         | n  | Cd (ppm) | Pb (ppm)        | Ni (ppm)        | As (ppm)        | Se (ppm)        | Hg (ppm) |
|----------------|----|----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------|
| Alausí–Chunchi | 15 | <0,25    | $6,60 \pm 1,40$ | $8,78 \pm 2,68$ | $0,53 \pm 0,76$ | $0,53 \pm 0,27$ | <0,05    |
| Riobamba       | 10 | <0,25    | <4              | $9,77 \pm 1,19$ | $0,52 \pm 0,26$ | $0,44 \pm 0,22$ | <0,05    |
| Guamote        | 15 | <0,25    | <4              | $5,47 \pm 1,20$ | $0,20 \pm 0,11$ | <0,20           | <0,05    |

*Valores expresados como media  $\pm$  desviación estándar (DE); n = número de muestras por cantón. En Cd, Pb y Hg predominan valores inferiores al límite de detección (LD). Nota. Elaborado por los Autores*

El arsénico (As) mostró concentraciones promedio similares en Alausí–Chunchi ( $0,53 \pm 0,76$  ppm) y Riobamba ( $0,52 \pm 0,26$  ppm), mientras que Guamote registró valores menores ( $0,20 \pm 0,11$  ppm). Se observó mayor dispersión en Alausí–Chunchi en comparación con los otros cantones.



En cuanto al selenio (Se), Alausí–Chunchi presentó un promedio de  $0,53 \pm 0,27$  ppm, Riobamba  $0,44 \pm 0,22$  ppm, mientras que en Guamote predominan valores inferiores a 0,20 ppm.

En conjunto, los resultados evidencian que Cd y Hg se mantuvieron por debajo del límite de detección en todas las muestras, mientras que Ni, As y Se mostraron concentraciones cuantificables con variabilidad inter-cantonal. El Pb presentó valores cuantificables únicamente en Alausí–Chunchi.

### 3.4.1 Metales no detectados o bajo límite de detección

La Tabla 23 presenta la frecuencia de muestras con concentraciones inferiores al límite de detección (LD) para cadmio (Cd), mercurio (Hg), plomo (Pb) y selenio (Se) en los tres cantones evaluados. El cadmio (Cd), con un límite de detección de 0,25 ppm, registró concentraciones inferiores al LD en el 100 % de las muestras analizadas en Alausí–Chunchi (15/15), Riobamba (10/10) y Guamote (15/15), evidenciando ausencia de valores cuantificables en la totalidad del conjunto muestral (40/40).

*Tabla 23: Frecuencia de detección de metales bajo límite analítico.*

| Metal | LD (ppm) | Alausí–Chunchi (n=15) | Riobamba (n=10) | Guamote (n=15) | Total bajo LD (%) |
|-------|----------|-----------------------|-----------------|----------------|-------------------|
| Cd    | 0,25     | 15 (100%)             | 10 (100%)       | 15 (100%)      | 100%              |
| Hg    | 0,05     | 15 (100%)             | 10 (100%)       | 15 (100%)      | 100%              |
| Pb    | 4,00     | 11 (73%)              | 10 (100%)       | 15 (100%)      | 90%               |
| Se    | 0,20     | 4 (27%)               | 0 (0%)          | 12 (80%)       | 40%               |

*Valores expresados como número de muestras bajo el límite de detección (LD) y porcentaje respecto al total por cantón. Nota. Elaborado por los Autores*

De manera similar, el mercurio (Hg), con un límite de detección de 0,05 ppm, presentó valores inferiores al LD en el 100 % de las muestras en los tres cantones, sin detecciones cuantificables en ningún caso. En el caso del plomo (Pb), con un límite de detección de 4,00 ppm, se observó que el 73 % de las muestras en Alausí–Chunchi (11/15) se situaron por debajo del LD, mientras que en Riobamba y Guamote el 100 % de las muestras presentaron concentraciones inferiores al

límite analítico. En términos globales, el 90 % del total de muestras evaluadas presentó valores no detectables para este metal.

Para el selenio (Se), con un límite de detección de 0,20 ppm, la frecuencia de valores bajo LD mostró variabilidad inter-cantonal. En Alausí–Chunchi, el 27 % de las muestras (4/15) se situaron por debajo del límite analítico, mientras que en Riobamba no se registraron valores inferiores al LD (0 %). En Guamote, el 80 % de las muestras (12/15) presentaron concentraciones inferiores al límite de detección. En conjunto, el 40 % del total de muestras evaluadas registró valores no detectables para este elemento.

Estos resultados evidencian que Cd y Hg permanecieron sistemáticamente por debajo del límite de detección en todas las unidades territoriales evaluadas, mientras que Pb y Se mostraron variabilidad en la frecuencia de detección entre cantones.

### 3.4.2 Níquel (Ni)

La Tabla 24 presenta los estadísticos descriptivos del contenido de níquel (Ni, ppm) en los suelos agrícolas evaluados en los tres cantones. Riobamba registró el mayor valor promedio ( $9,77 \pm 1,19$  ppm), con un rango comprendido entre 8,52 y 12,20 ppm, evidenciando una variabilidad relativamente baja, reflejada en su desviación estándar. Alausí–Chunchi presentó un promedio ligeramente inferior ( $8,78 \pm 2,68$  ppm), con un intervalo más amplio de variación (5,62–12,73 ppm), lo que indica mayor dispersión interna en comparación con Riobamba. Por su parte, Guamote registró el valor promedio más bajo ( $5,47 \pm 1,20$  ppm), con concentraciones que oscilaron entre 3,41 y 6,98 ppm.

*Tabla 24: Estadísticos descriptivos y comparación múltiple para Níquel (ppm).*

| <b>Cantón</b>  | <b>n</b> | <b>Media <math>\pm</math> DE</b> | <b>Mínimo</b> | <b>Máximo</b> |
|----------------|----------|----------------------------------|---------------|---------------|
| Riobamba       | 10       | $9,77 \pm 1,19^a$                | 8,52          | 12,20         |
| Alausí–Chunchi | 15       | $8,78 \pm 2,68^a$                | 5,62          | 12,73         |
| Guamote        | 15       | $5,47 \pm 1,20^b$                | 3,41          | 6,98          |

*Nota:* Media  $\pm$  desviación estándar (DE). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas según prueba de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). *Nota.* Elaborado por los Autores

La prueba de comparación múltiple de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ) evidenció que Riobamba y Alausí–Chunchi no presentan diferencias estadísticamente significativas entre sí (grupo a), mientras que Guamote conforma un grupo independiente (b), indicando concentraciones significativamente menores de níquel respecto a los otros dos cantones.

### **3.4.3 Arsénico (As)**

La Tabla 25 presenta los estadísticos descriptivos del contenido de arsénico (As, ppm) en los suelos agrícolas evaluados por cantón. Alausí–Chunchi registró un promedio de  $0,53 \pm 0,76$  ppm, con valores que oscilaron desde concentraciones inferiores al límite de detección ( $<0,125$  ppm) hasta un máximo de 3,05 ppm, evidenciando la mayor dispersión interna entre los cantones analizados. Riobamba presentó un promedio similar ( $0,52 \pm 0,26$  ppm), con un rango comprendido entre 0,00 y 0,96 ppm, mostrando menor variabilidad relativa en comparación con Alausí–Chunchi. Por su parte, Guamote registró el valor promedio más bajo ( $0,20 \pm 0,11$  ppm), con concentraciones entre valores inferiores a 0,12 ppm y un máximo de 0,40 ppm.

*Tabla 25: Estadísticos descriptivos y comparación múltiple para Arsénico (ppm).*

| <b>Cantón</b>  | <b>n</b> | <b>Media <math>\pm</math> DE</b> | <b>Mínimo</b> | <b>Máximo</b> |
|----------------|----------|----------------------------------|---------------|---------------|
| Alausí–Chunchi | 15       | $0,53 \pm 0,76^a$                | $<0,125$      | 3,05          |
| Riobamba       | 10       | $0,52 \pm 0,26^a$                | 0,00          | 0,96          |
| Guamote        | 15       | $0,20 \pm 0,11^b$                | $<0,12$       | 0,40          |

*Nota:* Media  $\pm$  desviación estándar (DE). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas según prueba de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). Nota. Elaborado por los Autores

La prueba de comparación múltiple de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ) indicó que Alausí–Chunchi y Riobamba no presentan diferencias estadísticamente significativas entre sí (grupo a), mientras que Guamote conforma un grupo independiente (b), evidenciando concentraciones significativamente menores de arsénico respecto a los otros dos cantones.

### 3.4.4 Selenio (Se)

La Tabla 26 presenta los estadísticos descriptivos del contenido de selenio (Se, ppm) en los suelos agrícolas evaluados por cantón. Alausí–Chunchi registró el mayor valor promedio ( $0,53 \pm 0,27$  ppm), con concentraciones que oscilaron desde valores inferiores al límite de detección ( $<0,20$  ppm) hasta un máximo de 1,13 ppm, evidenciando variabilidad moderada entre las muestras. Riobamba presentó un promedio ligeramente inferior ( $0,44 \pm 0,22$  ppm), con un rango comprendido entre 0,20 y 0,85 ppm, mostrando dispersión relativamente menor en comparación con Alausí–Chunchi.

*Tabla 26: Estadísticos descriptivos y comparación múltiple para Selenio (ppm).*

| <b>Cantón</b>  | <b>n</b> | <b>Media <math>\pm</math> DE</b> | <b>Mínimo</b> | <b>Máximo</b> |
|----------------|----------|----------------------------------|---------------|---------------|
| Alausí–Chunchi | 15       | $0,53 \pm 0,27^a$                | $<0,20$       | 1,13          |
| Riobamba       | 10       | $0,44 \pm 0,22^a$                | 0,20          | 0,85          |
| Guamote        | 15       | $<0,20^b$                        | $<0,20$       | 0,43          |

*Nota: Media  $\pm$  desviación estándar (DE). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas según prueba de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). En Guamote predominan valores bajo el límite de detección (LD). Nota. Elaborado por los Autores*

En contraste, Guamote presentó predominio de valores inferiores al límite de detección ( $<0,20$  ppm), registrando únicamente algunas determinaciones cuantificables con un valor máximo de 0,43 ppm. El promedio se situó por debajo del límite analítico del método empleado.

La prueba de comparación múltiple de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ) indicó que Alausí–Chunchi y Riobamba no presentan diferencias estadísticamente significativas entre sí (grupo <sup>a</sup>), mientras que Guamote conforma un grupo independiente (<sup>b</sup>), evidenciando concentraciones significativamente menores de selenio respecto a los otros cantones evaluados.

### 3.5 Aniones

La Tabla 27 presenta los estadísticos descriptivos de las concentraciones de cloruros ( $\text{Cl}^-$ ), nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) y fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) en los suelos agrícolas evaluados en los cantones Alausí–Chunchi, Riobamba y Guamote.

En el caso de los cloruros ( $\text{Cl}^-$ ), Riobamba registró el mayor valor promedio ( $538,14 \pm 184,96$  mg/L), seguido de Alausí–Chunchi ( $414,94 \pm 226,13$  mg/L), mientras que Guamote presentó el promedio más bajo ( $207,24 \pm 154,71$  mg/L). Se observó variabilidad moderada en los tres cantones, evidenciada por sus desviaciones estándar.

Para los nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), Guamote presentó el mayor valor promedio ( $193,48 \pm 87,12$  mg/L), considerablemente superior a los valores registrados en Alausí–Chunchi ( $22,04 \pm 12,64$  mg/L) y Riobamba ( $24,10 \pm 7,38$  mg/L), los cuales mostraron promedios similares entre sí y menor dispersión relativa.

En cuanto a los sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), Riobamba registró el promedio más alto ( $1139,91 \pm 707,34$  mg/L), con elevada variabilidad interna. Alausí–Chunchi presentó un promedio intermedio ( $575,69 \pm 164,38$  mg/L), mientras que Guamote mostró un promedio ligeramente inferior ( $453,96 \pm 735,45$  mg/L), destacándose en este último una amplia dispersión de los datos.

*Tabla 27: Estadísticos descriptivos de aniones por cantón.*

| Cantón         | n  | $\text{Cl}^-$ (mg/L) | $\text{NO}_3^-$ (mg/L) | $\text{SO}_4^{2-}$ (mg/L) | $\text{PO}_4^{3-}$ (mg/L) |
|----------------|----|----------------------|------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Alausí–Chunchi | 15 | $414,94 \pm 226,13$  | $22,04 \pm 12,64$      | $575,69 \pm 164,38$       | $19,83 \pm 23,33$         |
| Riobamba       | 10 | $538,14 \pm 184,96$  | $24,10 \pm 7,38$       | $1139,91 \pm 707,34$      | $35,00 \pm 19,38$         |
| Guamote        | 15 | $207,24 \pm 154,71$  | $193,48 \pm 87,12$     | $453,96 \pm 735,45$       | $47,51 \pm 45,71$         |

*Media  $\pm$  desviación estándar (DE). Letras diferentes en la misma columna indican diferencias estadísticamente significativas según prueba de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ); n = número de muestras por cantón. Nota. Elaborado por los Autores*

Respecto a los fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), Guamote registró el mayor valor promedio ( $47,51 \pm 45,71$  mg/L), seguido de Riobamba ( $35,00 \pm 19,38$  mg/L) y Alausí–Chunchi ( $19,83 \pm 23,33$  mg/L). En los tres cantones se evidenció variabilidad interna moderada a alta, particularmente en Guamote.

En conjunto, los resultados muestran diferencias cuantitativas en las concentraciones promedio de aniones entre los cantones evaluados, con patrones diferenciados según el tipo de ion analizado.

### **3.6 Transferencia suelo-planta (Biomasa vegetal)**

Los resultados del análisis de biomasa vegetal evidencian una distribución diferenciada de los elementos evaluados entre raíz, parte aérea y producto. Las concentraciones obtenidas muestran un patrón general de mayor acumulación en el sistema radicular, seguido por la parte aérea y finalmente el órgano comestible.

El sodio (Na) presentó las concentraciones más elevadas en comparación con los demás elementos analizados. En raíces, los valores oscilaron entre 104,84 ppm y 1800,67 ppm, destacándose una acumulación máxima en una de las muestras evaluadas (1800,67 ppm). En la parte aérea las concentraciones oscilaron entre 58,27 ppm y 1003,26 ppm, en tanto que en el producto fueron mucho menores, entre 51,04 ppm y 172,59 ppm. Estos resultados corroboran la gran movilidad del sodio en el sistema planta-suelo, siendo absorbido y trasladado a tejidos superiores.

Para el arsénico (As), se encontraron altas concentraciones en raíces en localizaciones puntuales, llegando a 143,66 ppm y 162,59 ppm, mientras que otras muestras presentaron bajas concentraciones como 0,32 ppm, 17,17 ppm o 31,09 ppm. En la aérea, los valores se minimizan, desde menos de 0,06 ppm hasta 35,85 ppm. En el producto, los valores fueron aún menores, no superando en ningún caso 6,137 ppm y 0,232 ppm, respectivamente, y manteniéndose en la mayoría de los casos por debajo del límite de detección. Este comportamiento indica una alta retención radicular y baja translocación hacia partes comestibles.

El cromo (Cr) en las raíces osciló entre 4,54 ppm y 6,48 ppm en las muestras detectables, y en la parte aérea entre 3,81 ppm y 6,19 ppm. En el producto, las concentraciones fueron menores a 3,5 ppm en la mayoría de los casos, detectándose un valor aislado de 4,8 ppm. Este comportamiento sugiere una movilidad intermedia en el sistema vegetal, pero sin llegar a una alta acumulación en el órgano comestible.

El níquel (Ni) se mantuvo por debajo del límite de cuantificación (<2,5 ppm) en raíces y fruto, detectándose solo una muestra aislada de 2,8 ppm en parte aérea. Estos resultados indican baja biodisponibilidad o absorción por la planta.

En cuanto al mercurio (Hg), las concentraciones en raíces variaron entre valores inferiores a 0,025 ppm y un máximo de 0,144 ppm. En la parte aérea, los valores oscilaron entre <0,025 ppm y 0,042 ppm, mientras que en el producto el valor máximo detectado fue 0,102 ppm. Estos niveles indican ausencia de acumulación significativa.

El cadmio (Cd) se mantuvo por debajo de 0,12 ppm en todos los órganos evaluados, mientras que el plomo (Pb) permaneció por debajo de 2 ppm en la totalidad de las muestras. De igual manera, el selenio (Se) presentó concentraciones inferiores a 0,1 ppm en todos los casos. Estos resultados son particularmente relevantes desde el punto de vista toxicológico, ya que no evidencian transferencia significativa de metales altamente peligrosos hacia la biomasa.

*Tabla 28: Concentración de metales y sodio en biomasa vegetal (ppm, base seca)*

| Elemento  | Órgano      | M1     | M2     | M3     | M4     | M5      | M6     | M7      | M8     |
|-----------|-------------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|---------|--------|
| <b>Na</b> | Raíz        | 133,34 | 917,60 | 104,84 | 397,46 | 1168,16 | 161,96 | 1800,67 | 323,60 |
|           | Parte aérea | 421,62 | 473,25 | 124,93 | 58,27  | 525,93  | 154,38 | 1003,26 | 215,50 |
|           | Producto    | —      | 51,04  | 113,34 | 104,07 | 118,09  | 172,59 | 54,08   | —      |
| <b>Hg</b> | Raíz        | 0,045  | 0,144  | <0,025 | <0,025 | <0,025  | <0,025 | 0,051   | 0,051  |
|           | Parte aérea | 0,041  | <0,025 | 0,042  | <0,025 | <0,025  | <0,025 | <0,025  | 0,031  |
|           | Producto    | —      | 0,102  | <0,025 | 0,029  | <0,025  | <0,025 | <0,025  | —      |
| <b>Cr</b> | Raíz        | 4,54   | <3,5   | <3,5   | 4,54   | 5,87    | <3,5   | 6,48    | 4,12   |
|           | Parte aérea | 6,06   | <3,5   | <3,5   | 4,10   | 3,81    | 4,37   | 6,19    | 5,99   |
|           | Producto    | —      | 3,5    | 4,8    | <3,5   | <3,5    | <3,5   | <3,5    | —      |
| <b>Ni</b> | Raíz        | <2,5   | <2,5   | <2,5   | <2,5   | <2,5    | <2,5   | <2,5    | <2,5   |
|           | Parte aérea | <2,5   | <2,5   | <2,5   | <2,5   | <2,5    | <2,5   | <2,5    | 2,8    |
|           | Producto    | —      | <2,5   | <2,5   | <2,5   | <2,5    | <2,5   | <2,5    | —      |
| <b>As</b> | Raíz        | <0,125 | 143,66 | 0,32   | 64,56  | 27,89   | 17,17  | 162,59  | 31,09  |
|           | Parte aérea | 20,73  | <0,06  | 7,07   | <0,06  | <0,06   | 22,79  | 23,60   | 35,85  |
|           | Producto    | —      | <0,06  | 6,137  | 0,232  | <0,06   | <0,06  | <0,06   | —      |
| <b>Cd</b> | Raíz        | <0,12  | <0,12  | <0,12  | <0,12  | <0,12   | <0,12  | <0,12   | <0,12  |
| <b>Pb</b> | Raíz        | <2     | <2     | <2     | <2     | <2      | <2     | <2      | <2     |
| <b>Se</b> | Raíz        | <0,1   | <0,1   | <0,1   | <0,1   | <0,1    | <0,1   | <0,1    | <0,1   |

*Nota: Valores expresados en base seca. — = no evaluado. Nota. Elaborado por los Autores*

### **3.7 Evaluación del impacto ambiental mediante Matriz de Leopold**

Con el objetivo de evaluar de manera integrada los impactos ambientales derivados de la presencia de metales pesados y de las actividades productivas en los cantones analizados, se aplicó la matriz de Leopold como herramienta de evaluación sistémica. Esta metodología permitió identificar la interacción entre factores ambientales y actividades antrópicas, facilitando la cuantificación de impactos en los componentes físico, biótico y socioeconómico.

La aplicación de esta matriz facilitó no solo la identificación de impactos negativos, sino también la detección de efectos positivos derivados de procesos de remediación y gestión ambiental, proporcionando una visión holística del sistema evaluado.

Con el objetivo de evaluar los impactos ambientales asociados a la presencia de metales pesados en el cantón Riobamba, se aplicó la matriz de Leopold como herramienta de análisis integral. Esta metodología permitió identificar las interacciones entre los componentes ambientales (abióticos, bióticos y socioeconómicos) y los factores de contaminación, facilitando una valoración sistemática de los efectos generados en el entorno.



Tabla 29:Matriz de Leopold de Riobamba

|                      |                                       | Magnitud: 1-10 Importancia: 1-10 |                                      | ACCIONES CON POSIBLES EFECTOS          |                   |                                       |                               |                                       |                                                       |                                     |                                 |                         |                    |     |
|----------------------|---------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|-------------------|---------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|-------------------------|--------------------|-----|
|                      |                                       |                                  |                                      | AGRICOLA                               |                   |                                       |                               |                                       |                                                       |                                     |                                 |                         | GANADERO           |     |
|                      |                                       |                                  |                                      | 1 Caída de ceniza volcanica del Sangay |                   |                                       |                               |                                       |                                                       |                                     |                                 |                         | 2 Caída de ceniza  |     |
| Componentes          |                                       | FACTORES ABIETALES               |                                      | Contaminación del suelo                | Alteración del pH | Alteración morfológica de las plantas | Inhibición de la fotosíntesis | Disminución de nutrientes en el suelo | Alteración de respiración de microorganismos y raíces | Disminución de crecimiento de fruto | Caída de la producción agrícola | Problemas reproductivos | Muerte de animales |     |
| FACTORES AMBIENTALES | A. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS | 1. Suelo                         | Uso de suelo                         | -1 4                                   | -1 4              |                                       |                               | -2 5                                  | -3 4                                                  |                                     |                                 |                         |                    |     |
|                      |                                       |                                  | Presencia de metales pesados         | -4 0                                   | -4 0              | 0 0                                   | 0 0                           | -10 0                                 | -12 0                                                 | 0 0                                 | 0 0                             | 0 0                     | 0 0                | 0 0 |
|                      |                                       | 2. Agua                          | Subterránea                          | -2 4                                   | -1 1              |                                       |                               | 1 4                                   | -2 2                                                  | -1 6                                | -2 5                            | -1 4                    | -2 5               |     |
|                      |                                       |                                  | Calidad de agua                      | -8 0                                   | -1 0              | 0 0                                   | 0 0                           | 4 0                                   | -4 0                                                  | -6 0                                | -10 0                           | -4 0                    | -10 0              |     |
|                      |                                       | 3. Atmósfera                     | Calidad del aire (gases, partículas) | -1 4                                   | 1 4               |                                       |                               |                                       |                                                       |                                     |                                 |                         |                    |     |
|                      |                                       |                                  | Calidad del aire (gases, partículas) | -4 0                                   | 4 0               | 0 0                                   | 0 0                           | 0 0                                   | 0 0                                                   | 0 0                                 | 0 0                             | 0 0                     | 0 0                |     |
|                      |                                       | 4. Procesos                      | Calidad del aire (gases, partículas) | -1 4                                   | -1 5              |                                       |                               | -1 4                                  |                                                       |                                     | -2 5                            |                         |                    |     |
|                      |                                       |                                  | Modificación del paisaje             | -4 0                                   | -5 0              | 0 0                                   | 0 0                           | -4 0                                  | 0 0                                                   | 0 0                                 | -10 0                           | 0 0                     | 0 0                |     |
|                      | B. BIÓTICO                            | 1. Flora                         | Pastos                               | 0 0                                    | 0 0               | 0 0                                   | 0 0                           | 0 0                                   | 0 0                                                   | 0 0                                 | 0 0                             | 0 0                     | -1 5               |     |
|                      |                                       |                                  | Productos agrícolas                  | 0 0                                    | 0 0               | 0 0                                   | 0 0                           | 0 0                                   | 0 0                                                   | 0 0                                 | -1 5                            | 0 0                     | -5 0               |     |
|                      |                                       | 2. Fauna                         | Animales terrestres( de granja)      | 0 0                                    | 0 0               | 0 0                                   | 0 0                           | 0 0                                   | 0 0                                                   | 0 0                                 | -5 0                            | 0 0                     | -1 4               |     |
|                      |                                       |                                  | Microfauna                           | 0 0                                    | -1 5              | -1 5                                  | -1 5                          | -1 6                                  | -2 4                                                  |                                     | 0 0                             | 0 0                     | -4 0               |     |
|                      | C. SOCIOECONÓMICO                     | 1. Uso de la tierra              | Microfauna                           | 0 0                                    | -5 0              | -5 0                                  | -5 0                          | -6 0                                  | -8 0                                                  | 0 0                                 | 0 0                             | 0 0                     | -1 4               |     |
|                      |                                       |                                  | Área Comercial                       | 0 0                                    | 0 0               | 0 0                                   | 0 0                           | 0 0                                   | 0 0                                                   | 0 0                                 | 0 0                             | 0 0                     | -4 0               |     |
|                      |                                       | 2. Social                        | Agricultura                          | 0 0                                    | 0 0               | 0 0                                   | 0 0                           | 0 0                                   | 0 0                                                   | 0 0                                 | 0 0                             | 0 0                     | 0 0                |     |
|                      |                                       |                                  | Patrones culturales (estilo de vida) | 0 0                                    | 0 0               | 0 0                                   | 0 0                           | 0 0                                   | 0 0                                                   | 0 0                                 | 0 0                             | 0 0                     | 0 0                |     |
|                      |                                       |                                  | Empleo                               | 0 0                                    | 0 0               | 0 0                                   | 0 0                           | 0 0                                   | 0 0                                                   | 0 0                                 | -2 6                            | 0 0                     | 0 0                |     |
|                      |                                       |                                  | Salud y seguridad                    | 0 0                                    | 0 0               | 0 0                                   | 0 0                           | 0 0                                   | 0 0                                                   | 0 0                                 | -12 0                           | 0 0                     | 0 0                |     |
|                      |                                       | 3. Economico                     | Economía local                       | 0 0                                    | 0 0               | 0 0                                   | 0 0                           | 0 0                                   | 0 0                                                   | 0 0                                 | -3 6                            | 0 0                     | -3 5               |     |
|                      |                                       |                                  | Manejo de residuos                   | 0 0                                    | 0 0               | 0 0                                   | 0 0                           | 0 0                                   | 0 0                                                   | 0 0                                 | -18 0                           | 0 0                     | -15 0              |     |
|                      |                                       |                                  | Manejo de residuos                   | 0 0                                    | 0 0               | 0 0                                   | 0 0                           | 0 0                                   | 0 0                                                   | 0 0                                 | 0 0                             | 0 0                     | 0 0                |     |
|                      |                                       |                                  |                                      | 0 0                                    | 0 0               | 0 0                                   | 0 0                           | 0 0                                   | 0 0                                                   | 0 0                                 | 0 0                             | 0 0                     | 0 0                |     |
|                      |                                       | promedios positivos              |                                      | 1                                      |                   | 1                                     |                               | 1                                     |                                                       | 1                                   |                                 | 1                       |                    |     |
|                      |                                       | promedios negativos              |                                      | 4                                      |                   | 4                                     |                               | 3                                     |                                                       | 3                                   |                                 | 5                       |                    |     |
|                      |                                       | promedios aritméticos            |                                      | -20                                    |                   | -11                                   |                               | -5                                    |                                                       | -5                                  |                                 | -24                     |                    |     |
|                      |                                       |                                  |                                      |                                        |                   |                                       |                               |                                       |                                                       |                                     |                                 |                         |                    |     |
|                      |                                       |                                  |                                      |                                        |                   |                                       |                               |                                       |                                                       |                                     |                                 |                         |                    |     |
|                      |                                       |                                  |                                      |                                        |                   |                                       |                               |                                       |                                                       |                                     |                                 |                         |                    |     |
|                      |                                       |                                  |                                      |                                        |                   |                                       |                               |                                       |                                                       |                                     |                                 |                         |                    |     |
|                      |                                       |                                  |                                      |                                        |                   |                                       |                               |                                       |                                                       |                                     |                                 |                         |                    |     |
|                      |                                       |                                  |                                      |                                        |                   |                                       |                               |                                       |                                                       |                                     |                                 |                         |                    |     |
|                      |                                       |                                  |                                      |                                        |                   |                                       |                               |                                       |                                                       |                                     |                                 |                         |                    |     |

| SOCIOECONOMICA                      |                          |                           |                                    |                        |                                     |                                      | SOCIAL                           |                     |                     |                           |                        |                            |      |      |      |
|-------------------------------------|--------------------------|---------------------------|------------------------------------|------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------------|------------------------|----------------------------|------|------|------|
| 3. Actividad volcanica              |                          |                           |                                    |                        |                                     |                                      | 4. Caída de la ceniza del Sangay |                     |                     |                           |                        |                            |      |      |      |
| Mantenimiento de la infraestructura | Obstruccion respiratoria | Restriccion del paso vial | Pérdida de produccion agropecuaria | Baja comercializació n | Daños dermatológicos e intestinales | Migracion de jóvenes hacia la ciudad | Promedios positivos              | Promedios negativos | Promedio aritmético | Impacto por subcomponente | Impacto por componente | Impacto total del proyecto |      |      |      |
|                                     |                          |                           | -1                                 | 5                      |                                     |                                      |                                  | 5                   | -35                 | -110                      | -155                   | -475                       |      |      |      |
| 0 0                                 | 0 0                      | 0 0                       | -5 0                               | 0 0                    | 0 0                                 | 0 0                                  |                                  |                     |                     |                           |                        |                            |      |      |      |
|                                     | -2                       | 6                         | -1                                 | 6                      |                                     |                                      | 1                                | 12                  | -75                 |                           |                        |                            |      |      |      |
| 0 0                                 | -12 0                    | 0 0                       | -6 0                               | 0 0                    | 0 0                                 | 0 0                                  |                                  |                     |                     | -36                       |                        |                            | -114 |      |      |
| 0 0                                 | 0 0                      | 0 0                       | 0 0                                | 0 0                    | 0 0                                 | 0 0                                  | 1                                | 1                   | 0                   |                           |                        |                            |      |      |      |
|                                     |                          |                           | -1                                 | 4                      |                                     |                                      |                                  | 7                   | -36                 |                           |                        |                            |      |      |      |
| 0 0                                 | 0 0                      | 0 0                       | -4 0                               | 0 0                    | 0 0                                 | 0 0                                  |                                  |                     |                     | -4                        |                        |                            |      | -206 |      |
|                                     | -1                       | 4                         |                                    |                        |                                     |                                      |                                  | 1                   | -4                  |                           |                        |                            |      |      |      |
| 0 0                                 | -4 0                     | 0 0                       | 0 0                                | 0 0                    | 0 0                                 | 0 0                                  |                                  |                     |                     |                           |                        |                            |      |      |      |
| -1                                  | 5                        |                           |                                    |                        |                                     |                                      |                                  | 1                   | -5                  | -46                       |                        |                            |      |      | -206 |
| -5 0                                | 0 0                      | 0 0                       | 0 0                                | 0 0                    | 0 0                                 | 0 0                                  |                                  | 4                   | -25                 |                           |                        |                            |      |      |      |
| 0 0                                 | 0 0                      | 0 0                       | 0 0                                | 0 0                    | 0 0                                 | 0 0                                  |                                  | 3                   | -21                 |                           |                        |                            |      |      |      |
| 0 0                                 | 0 0                      | 0 0                       | -4 0                               | -12 0                  | 0 0                                 | 0 0                                  |                                  |                     |                     | -68                       | -206                   |                            |      |      |      |
|                                     |                          |                           | -3                                 | 4                      |                                     |                                      |                                  | 5                   | -39                 |                           |                        |                            |      |      |      |
| 0 0                                 | 0 0                      | 0 0                       | -4 0                               | -12 0                  | 0 0                                 | 0 0                                  |                                  | 5                   | -29                 |                           |                        |                            |      |      |      |
| 0 0                                 | 0 0                      | 0 0                       | 0 0                                | 0 0                    | 0 0                                 | 0 0                                  |                                  |                     |                     | -81                       |                        |                            | -206 |      |      |
|                                     |                          |                           | -2                                 | -3                     | 6                                   | -2                                   |                                  | 6                   | -51                 |                           |                        |                            |      |      |      |
| 0 0                                 | 0 0                      | 0 0                       | -8 0                               | -18 0                  | 0 0                                 | -12 0                                |                                  |                     |                     |                           |                        |                            |      |      |      |
|                                     |                          |                           | -2                                 | -2                     | 5                                   | -2                                   |                                  | 3                   | -30                 | -51                       |                        |                            |      | -206 |      |
| 0 0                                 | 0 0                      | 0 0                       | -10 0                              | -10 0                  | 0 0                                 | -10 0                                |                                  |                     |                     |                           |                        |                            |      |      |      |
|                                     |                          |                           | 1                                  | 5                      |                                     | 1                                    | 1                                | 5                   |                     |                           |                        |                            |      |      |      |
| 0 0                                 | 0 0                      | 0 0                       | 0 0                                | 0 0                    | 0 0                                 | 5 0                                  |                                  |                     |                     | -74                       |                        |                            |      |      | -206 |
|                                     |                          |                           |                                    |                        |                                     |                                      |                                  | 2                   | -18                 |                           |                        |                            |      |      |      |
| 0 0                                 | 0 0                      | 0 0                       | 0 0                                | 0 0                    | 0 0                                 | 0 0                                  |                                  |                     |                     |                           |                        |                            |      |      |      |
|                                     | -2                       | 5                         | -1                                 | 5                      | -3                                  | 5                                    |                                  | 4                   | -38                 | -74                       | -206                   |                            |      |      |      |
| 0 0                                 | -10 0                    | 0 0                       | -5 0                               | 0 0                    | -13 0                               | 0 0                                  |                                  |                     |                     |                           |                        |                            |      |      |      |
|                                     |                          |                           | -1                                 | -3                     | -3                                  | -3                                   |                                  | 6                   | -69                 |                           |                        |                            |      |      |      |
| 0 0                                 | 0 0                      | 0 0                       | -12 0                              | -12 0                  | 0 0                                 | -12 0                                |                                  |                     |                     | -74                       |                        |                            | -206 |      |      |
|                                     |                          |                           | -1                                 | 5                      |                                     |                                      |                                  | 1                   | -5                  |                           |                        |                            |      |      |      |
| 0 0                                 | 0 0                      | 0 0                       | -5 0                               | 0 0                    | 0 0                                 | 0 0                                  |                                  |                     |                     |                           |                        |                            |      |      |      |
| 1                                   | 3                        | 1                         | 9                                  | 5                      | 1                                   | 3                                    |                                  | 66                  |                     |                           |                        |                            |      |      |      |
| -5                                  | -26                      | 0                         | -63                                | -64                    | -13                                 | -29                                  |                                  |                     | -475                |                           |                        |                            |      |      |      |

Nota. Elaborado por los Autores

Los resultados evidencian que el componente suelo presenta la mayor concentración de impactos negativos, particularmente en procesos de contaminación, acidificación y alteración de la materia orgánica. Estas afectaciones inciden directamente en la pérdida de fertilidad del suelo y en la disminución de su capacidad de retención de nutrientes, lo que compromete la sostenibilidad de los

sistemas agrícolas. A partir de la distribución de interacciones, se infiere que este componente presenta un nivel de impacto alto, constituyéndose como el principal foco de degradación ambiental.

En relación con el recurso hídrico, se identifican impactos asociados a la calidad del agua, lo que sugiere procesos de lixiviación y transporte de metales pesados hacia cuerpos de agua superficiales y subterráneos. Esta situación representa un riesgo tanto para los ecosistemas acuáticos como para el uso del agua en actividades productivas y consumo humano. Estos impactos pueden considerarse indirectos, ya que se originan en el suelo y se trasladan hacia otros componentes del sistema.

En el componente biótico, se observa una reducción significativa de la diversidad microbiana y de la microfauna del suelo, lo que afecta procesos ecológicos fundamentales como la descomposición y el reciclaje de nutrientes. Estas alteraciones repercuten en la productividad agrícola y en la estabilidad de los ecosistemas. De manera indirecta, estos efectos impactan en el componente socioeconómico, evidenciándose en la disminución del rendimiento productivo.

Desde una perspectiva temporal, los impactos sobre el suelo y los sistemas bióticos tienden a manifestarse a mediano y largo plazo, mientras que los efectos en el aire son de carácter más inmediato y transitorio. Esta diferenciación permite comprender la persistencia de los daños ambientales y la necesidad de implementar estrategias sostenidas de monitoreo y recuperación.

Para analizar los efectos de la caída de ceniza volcánica en los cantones Alausí y Chunchi, se empleó la matriz de Leopold considerando la interacción entre los factores ambientales y los impactos derivados de la actividad volcánica. Este enfoque permitió identificar de manera estructurada las alteraciones en los sistemas naturales, productivos y sociales.

**Tabla 30: Matriz de Leopold en el cantón Alausí y Chunchi**

| Zona           |                  |                                    | Agrícola                  |                         |                                                          |                                                  |                                                   |                                                      |                                                    |                                            |                                       |                                                         |                                  |                                             |                                 |                                        |                                                  |                                        |                              |
|----------------|------------------|------------------------------------|---------------------------|-------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------|
| Actividad      |                  |                                    | Caída de ceniza volcánica |                         |                                                          |                                                  |                                                   |                                                      |                                                    |                                            |                                       |                                                         |                                  |                                             |                                 |                                        |                                                  |                                        |                              |
|                | Factor ambiental | Aspecto                            |                           |                         |                                                          |                                                  |                                                   |                                                      |                                                    |                                            |                                       |                                                         |                                  |                                             |                                 |                                        |                                                  |                                        |                              |
|                |                  |                                    | Contaminación del suelo   | Acidificación del suelo | Disminución de la adsorción específica de otros cationes | Alteración de la composición de materia orgánica | Inhibición de la actividad enzimática en el suelo | Desequilibrio de micro y micronutrientes en el suelo | Inhibición de procesos de mineralización en suelos | Baja acumulación de nutrientes en el suelo | Reducción de la diversidad microbiana | Aumento de microorganismos resistentes a metales pesado | Pérdida de micro fauna del suelo | Deficiencia de macronutrientes para plantas | Alteración del tamaño del fruto | Reducción en el crecimiento de plantas | Disminución de contenido de clorofila en plantas | Reducción de la producción de cultivos | Necrosis de hojas de plantas |
| Abiótico       | Suelo            | Presencia de metales pesados       | x                         | x                       | x                                                        | x                                                | x                                                 | x                                                    | x                                                  | x                                          | x                                     | x                                                       | x                                | x                                           | x                               | x                                      | x                                                | x                                      | x                            |
|                |                  | Uso del suelo                      | x                         | x                       | x                                                        | x                                                | x                                                 | x                                                    | x                                                  | x                                          | x                                     | x                                                       | x                                | x                                           |                                 |                                        |                                                  |                                        |                              |
|                |                  | Relieve                            |                           |                         |                                                          |                                                  |                                                   |                                                      |                                                    |                                            |                                       |                                                         |                                  |                                             |                                 |                                        |                                                  |                                        |                              |
|                | Aire             | Material particulado               |                           |                         |                                                          |                                                  |                                                   |                                                      |                                                    |                                            |                                       |                                                         |                                  |                                             |                                 |                                        |                                                  |                                        |                              |
|                |                  | Gases                              |                           |                         |                                                          |                                                  |                                                   |                                                      |                                                    |                                            |                                       |                                                         |                                  |                                             |                                 |                                        |                                                  |                                        |                              |
|                | Agua             | Calidad de agua                    | x                         | x                       | x                                                        | x                                                |                                                   | x                                                    |                                                    |                                            |                                       |                                                         | x                                | X                                           |                                 |                                        |                                                  | x                                      |                              |
|                |                  | Transporte de material particulado |                           |                         |                                                          |                                                  |                                                   |                                                      |                                                    |                                            |                                       |                                                         |                                  |                                             |                                 |                                        |                                                  |                                        |                              |
|                | Perceptual       | Modificació n del paisaje          |                           |                         |                                                          |                                                  |                                                   |                                                      |                                                    |                                            |                                       |                                                         |                                  |                                             |                                 |                                        |                                                  |                                        |                              |
|                | Biótico          | Flora                              | Cultivos                  |                         |                                                          |                                                  |                                                   |                                                      |                                                    |                                            |                                       |                                                         |                                  |                                             |                                 |                                        |                                                  |                                        |                              |
|                |                  |                                    | Pastos                    |                         |                                                          |                                                  |                                                   |                                                      |                                                    |                                            |                                       |                                                         |                                  |                                             |                                 |                                        |                                                  |                                        |                              |
|                |                  | Fauna                              | Micro fauna               |                         | x                                                        |                                                  |                                                   | x                                                    | x                                                  | x                                          |                                       | x                                                       |                                  |                                             |                                 |                                        |                                                  |                                        |                              |
|                |                  |                                    | Animales de granja        |                         |                                                          |                                                  |                                                   |                                                      |                                                    |                                            |                                       |                                                         |                                  |                                             |                                 |                                        |                                                  |                                        |                              |
| Socioeconómico | Económico        | Economía local                     |                           |                         |                                                          |                                                  |                                                   |                                                      |                                                    |                                            |                                       |                                                         |                                  |                                             |                                 |                                        |                                                  |                                        |                              |

|  |        |                     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|--|--------|---------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
|  | Social | Calidad vida        |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |        | Salud               |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |        | Relaciones sociales |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |        | Cambio de patrón    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |        |                     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

| Zona      |                  |                                    | Ganadera                         |                                          |                                    |                                  |                  |                     |                                            |                          |                                        |                             | Socioeconómica             |                                      |                                  |                                     |                                       |                            | Social                       |                                                 |
|-----------|------------------|------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|------------------|---------------------|--------------------------------------------|--------------------------|----------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------------------------------|
| Actividad |                  |                                    | Caída de ceniza volcánica        |                                          |                                    |                                  |                  |                     |                                            |                          |                                        |                             | Actividad volcánica        |                                      |                                  |                                     |                                       |                            | caída de la ceniza volcánica |                                                 |
|           | Factor ambiental | Aspecto                            | Problemas digestivos en animales | Intoxicación de animales en la comunidad | muerte de animales de la comunidad | Déficit nutricional en el animal | calidad de leche | calidad de la carne | Disminución de la masa muscular del ganado | Baja producción de leche | Disminución del potencial reproductivo | Daños en la infraestructura | comunicación vial limitada | Afectación en maquinarias de trabajo | Daños en la infraestructura vial | Dificultad para la comercialización | Obstrucción de medios de comunicación | Enfermedades respiratorias | Daños intestinales           | Falta de personal joven para cultivar la tierra |
| Abiótico  | Suelo            | Presencia de metales pesados       | x                                | x                                        | x                                  | x                                | x                | x                   |                                            |                          |                                        |                             |                            |                                      |                                  |                                     |                                       |                            |                              |                                                 |
|           |                  | Uso del suelo                      |                                  |                                          |                                    |                                  |                  |                     |                                            |                          |                                        |                             |                            |                                      |                                  |                                     |                                       |                            |                              |                                                 |
|           |                  | Relieve                            |                                  |                                          |                                    |                                  |                  |                     |                                            |                          |                                        |                             |                            |                                      | x                                |                                     |                                       |                            |                              |                                                 |
|           | Aire             | Material particulado               |                                  |                                          |                                    |                                  |                  |                     |                                            |                          |                                        |                             |                            |                                      |                                  |                                     |                                       | x                          | x                            |                                                 |
|           |                  | Gases                              |                                  |                                          |                                    |                                  |                  |                     |                                            |                          |                                        |                             |                            |                                      |                                  |                                     |                                       |                            |                              |                                                 |
|           | Agua             | Calidad de agua                    | x                                | x                                        | x                                  | x                                | x                | x                   | x                                          | x                        | x                                      | x                           | x                          | x                                    | x                                | x                                   | x                                     | x                          | x                            | x                                               |
|           |                  | Transporte de material particulado |                                  |                                          |                                    |                                  |                  |                     |                                            |                          |                                        |                             |                            |                                      |                                  |                                     |                                       |                            |                              |                                                 |
|           | Perceptual       | Modificación del paisaje           |                                  |                                          |                                    |                                  |                  |                     |                                            |                          |                                        |                             |                            |                                      |                                  |                                     |                                       |                            |                              |                                                 |
|           |                  |                                    |                                  |                                          |                                    |                                  |                  |                     |                                            |                          |                                        |                             |                            |                                      |                                  |                                     |                                       |                            |                              |                                                 |
|           | Biótico          | Flora                              | Cultivos                         | x                                        | x                                  |                                  | x                |                     | x                                          |                          | x                                      |                             |                            |                                      |                                  |                                     |                                       |                            |                              |                                                 |
| Pastos    |                  |                                    | x                                | x                                        |                                    | x                                |                  |                     |                                            |                          |                                        |                             |                            |                                      |                                  |                                     |                                       |                            |                              |                                                 |
| Fauna     |                  | Micro fauna                        |                                  |                                          |                                    |                                  |                  |                     |                                            |                          |                                        |                             |                            |                                      |                                  |                                     |                                       |                            |                              |                                                 |

|                |           |                     |   |   |  |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|----------------|-----------|---------------------|---|---|--|---|--|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Socioeconómico | Económico | Animales de granja  | x | x |  | x |  | x |   | x |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|                |           | Economía local      |   |   |  |   |  | x |   |   | x | x | x | x | x | x | x |   |   |
|                |           | Calidad vida        | x | x |  |   |  |   | x |   |   |   |   |   |   | x | x | x | X |
|                | Social    | Salud               | x | x |  | x |  | x |   | x |   |   |   |   |   |   | x | x |   |
|                |           | Relaciones sociales |   |   |  |   |  |   |   |   |   | x |   |   | x | x | x |   | X |
|                |           | Cambio de patrón    |   |   |  |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   | X |
|                |           |                     |   |   |  |   |  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |

Nota. Elaborado por los Autores

Los resultados muestran que el componente suelo es uno de los más afectados por la deposición de ceniza volcánica, debido a la incorporación de metales pesados que alteran sus propiedades físicoquímicas. Esto genera procesos de acidificación, pérdida de nutrientes y disminución de la actividad biológica, afectando directamente la productividad agrícola. Asimismo, se identifica un efecto en cadena en el cual la degradación del suelo influye progresivamente en otros componentes del sistema.

En el componente biótico, se evidencian impactos relevantes en cultivos, pastos y fauna, especialmente en la salud de los animales y en la calidad de los productos derivados, como leche y carne. Estas afectaciones reflejan una alteración en las cadenas tróficas y en los sistemas productivos, lo que compromete la estabilidad de la actividad ganadera. La transferencia de contaminantes desde el suelo hacia organismos vivos evidencia una alta interconexión ecológica.

En el ámbito socioeconómico, los impactos se manifiestan en la economía local, la salud de la población y las condiciones de vida, debido a la disminución de la producción y a la afectación de los medios de subsistencia. Además, se identifican problemas en infraestructura y comunicación, lo que evidencia la amplitud de los efectos generados por el fenómeno volcánico.

En este contexto, se infiere una alta vulnerabilidad del territorio frente a eventos volcánicos, especialmente en sistemas productivos dependientes del suelo

y del agua. Asimismo, la reducción en la calidad de productos agrícolas y ganaderos sugiere un riesgo potencial para la seguridad alimentaria, lo que refuerza la necesidad de estrategias integrales de gestión del riesgo.

Con el fin de evaluar los impactos ambientales asociados a las actividades productivas y las acciones de gestión ambiental en los cantones estudiados, se aplicó la matriz de Leopold considerando procesos como la siembra, riego, ganadería, monitoreo y remediación. Esta evaluación permitió analizar tanto los efectos negativos derivados de las prácticas productivas como los impactos positivos generados por las estrategias de mitigación.

**Tabla 31: Matriz de Leopold en el cantón Alausí y Chunchi**

| Medio ambiente |            |                             | Siembra de cultivos     |                                                                                |                                  |                                               |              |             |  |
|----------------|------------|-----------------------------|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------------|--------------|-------------|--|
| Medio          | Componente | Factor ambiental            | Preparación del terreno | Aplicación de fertilizantes<br><small>residuos orgánicos e inorgánicos</small> | Señalización del área de siembra | Tratamiento y disposición de desechos solidos |              |             |  |
|                |            |                             |                         |                                                                                |                                  | Orgánicos                                     |              | Inorgánicos |  |
|                |            |                             |                         |                                                                                |                                  | Residuos orgánicos                            | Incineración |             |  |
| Medio físico   | Atmosfera  | Aire                        | 28                      |                                                                                | 18                               | 17                                            | 27           | 13          |  |
|                |            | Ruido                       | 10                      |                                                                                |                                  |                                               | 15           |             |  |
|                | Agua       | Agua superficial            | 32                      |                                                                                |                                  |                                               |              |             |  |
|                |            | Aguas subterráneas          |                         |                                                                                |                                  |                                               |              |             |  |
|                | Suelo      | Cobertura vegetal           | 22                      |                                                                                | 26                               | 21                                            |              | 27          |  |
|                |            | Calidad del suelo           | 16                      |                                                                                | 25                               | 37                                            | 20           |             |  |
|                |            | Geomorfología               | 17                      |                                                                                |                                  |                                               |              |             |  |
|                |            | Paisajismo                  | 18                      | 14                                                                             | 24                               | 20                                            | 19           | 21          |  |
|                |            |                             |                         |                                                                                |                                  |                                               |              |             |  |
| Medio biótico  | Flora      | Especies arboreas           | 10                      | 18                                                                             |                                  |                                               |              |             |  |
|                |            | Especies arbustivas menores | 26                      |                                                                                |                                  |                                               |              |             |  |
|                |            | Flora local                 | 26                      |                                                                                |                                  |                                               |              |             |  |
|                | Fauna      | Fauna terrestre             | 20                      |                                                                                |                                  | 18                                            | 17           |             |  |
|                |            | Hábitat                     | 20                      | 17                                                                             | 24                               |                                               |              |             |  |
|                |            |                             |                         |                                                                                |                                  |                                               |              |             |  |
|                |            |                             |                         |                                                                                |                                  |                                               |              |             |  |

| Medio social | Calidad de vida         | Salud  | 15  | 20 | 16 | 15 | 33  | 15 |            |
|--------------|-------------------------|--------|-----|----|----|----|-----|----|------------|
|              |                         | Empleo |     |    |    |    |     |    |            |
|              | Aspectos psicologicos   |        |     |    |    |    |     |    |            |
|              | Actividades productivas |        |     |    |    |    |     |    |            |
|              |                         |        | 0   | 0  | 48 | 96 | 0   | 63 | <b>207</b> |
|              |                         |        | 244 | 49 | 85 | 17 | 116 | 13 | <b>524</b> |

| Medio ambiente |                         |                             | Riego de cultivos                |                                                |                        |            | Area de ganadería  |                   |                        |                                   |            |
|----------------|-------------------------|-----------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------|------------------------|------------|--------------------|-------------------|------------------------|-----------------------------------|------------|
| Medio          | Componente              | Factor ambiental            | Preparación del sistema de riego | Riego de cultivos por dispersión y escorrentía | Almacenamiento de agua |            | Área de abrevadero | Área de comederos | Almacenamiento de agua | Recolección de desechos orgánicos |            |
| Medio físico   | Atmosfera               | Aire                        | 22                               | 14                                             | 26                     |            |                    | 25                | 21                     | 25                                |            |
|                |                         | Ruido                       | 10                               |                                                |                        |            | 22                 | 16                |                        |                                   |            |
|                | Agua                    | Agua superficial            | 27                               | 22                                             | 23                     |            | 15                 | 12                | 22                     |                                   |            |
|                |                         | Aguas subterráneas          | 33                               | 33                                             | 10                     |            | 24                 | 34                | 23                     |                                   |            |
|                | Suelo                   | Cobertura vegetal           | 27                               | 28                                             |                        |            | 25                 | 32                |                        | 30                                |            |
|                |                         | Calidad del suelo           | 39                               | 33                                             | 18                     |            | 38                 | 38                | 36                     | 39                                |            |
|                |                         | Geomorfología               |                                  |                                                |                        |            |                    |                   |                        |                                   |            |
|                |                         | Paisajismo                  | 40                               | 42                                             |                        |            | 24                 | 27                | 26                     |                                   |            |
|                |                         |                             |                                  |                                                |                        |            |                    |                   |                        |                                   |            |
| Medio biótico  | Flora                   | Especies arbóreas           | 29                               | 28                                             |                        |            |                    |                   |                        |                                   |            |
|                |                         | Especies arbustivas menores | 34                               | 28                                             | 27                     |            |                    | 27                | 18                     | 34                                |            |
|                |                         | Flora local                 | 35                               | 17                                             | 27                     |            |                    | 27                | 18                     |                                   |            |
|                | Fauna                   | Fauna terrestre             |                                  | 22                                             | 26                     |            | 22                 | 20                | 22                     | 26                                |            |
|                |                         | Hábitat                     | 22                               | 24                                             |                        |            | 24                 | 24                | 24                     | 36                                |            |
|                |                         |                             |                                  |                                                |                        |            |                    |                   |                        |                                   |            |
|                |                         |                             |                                  |                                                |                        |            |                    |                   |                        |                                   |            |
| Medio social   | Calidad de vida         | Salud                       | 10                               | 21                                             | 25                     |            | 14                 | 16                | 18                     | 23                                |            |
|                |                         | Empleo                      |                                  |                                                |                        |            |                    |                   |                        |                                   |            |
|                | Aspectos psicológicos   |                             |                                  |                                                |                        |            |                    |                   |                        |                                   |            |
|                | Actividades productivas |                             |                                  |                                                |                        |            |                    |                   |                        |                                   |            |
|                |                         |                             |                                  |                                                |                        |            |                    |                   |                        |                                   |            |
|                |                         |                             | 318                              | 298                                            | 80                     | <b>696</b> | 157                | 254               | 188                    | 213                               | <b>812</b> |
|                |                         |                             | 10                               | 14                                             | 92                     | <b>116</b> | 22                 | 16                | 0                      | 0                                 | <b>38</b>  |



| Medio ambiente |                         |                             | Monitoreo de contaminación  |     | Transporte                                   |     |
|----------------|-------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----|----------------------------------------------|-----|
| Medio          | Componente              | Factor ambiental            | Muestreo de suelo y biomasa |     | Transporte de productos agrícolas al mercado |     |
| Medio físico   | Atmosfera               | Aire                        | 16                          |     | 26                                           |     |
|                |                         | Ruido                       |                             |     | 27                                           |     |
|                | Agua                    | Agua superficial            | 38                          |     |                                              |     |
|                |                         | Aguas subterráneas          | 34                          |     |                                              |     |
|                | Suelo                   | Cobertura vegetal           | 24                          |     |                                              |     |
|                |                         | Calidad del suelo           | 50                          |     |                                              |     |
|                |                         | Geomorfología               |                             |     |                                              |     |
|                |                         | Paisajismo                  |                             |     |                                              |     |
|                |                         |                             |                             |     |                                              |     |
|                |                         |                             |                             |     |                                              |     |
| Medio biótico  | Flora                   | Especies arbóreas           |                             |     |                                              |     |
|                |                         | Especies arbustivas menores | 37                          |     |                                              |     |
|                |                         | Flora local                 | 40                          |     |                                              |     |
|                | Fauna                   | Fauna terrestre             | 41                          |     |                                              |     |
|                |                         | Hábitat                     | 40                          |     |                                              |     |
|                |                         |                             |                             |     |                                              |     |
|                |                         |                             |                             |     |                                              |     |
| Medio social   | Calidad de vida         | Salud                       | 35                          |     |                                              |     |
|                |                         | Empleo                      |                             |     |                                              |     |
|                | Aspectos psicológicos   |                             |                             |     |                                              |     |
|                | Actividades productivas |                             |                             |     |                                              |     |
|                |                         |                             |                             |     |                                              |     |
|                |                         |                             | 339                         | 339 | 562                                          | 562 |
|                |                         |                             | 16                          | 16  | 27                                           | 27  |

| Medio ambiente |                         |                             | Identificación de puntos de remediación |                                                  |            | Certificación de seguimiento y documentación del proyecto |           |                              |                                 |
|----------------|-------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------|------------|-----------------------------------------------------------|-----------|------------------------------|---------------------------------|
| Medio          | Componente              | Factor ambiental            | Análisis de muestras                    | Identificación de puntos críticos de remediación |            | Señalización de comunidades críticas                      |           | Número de impactos positivos | Sumatoria de impactos positivos |
| Medio físico   | Atmosfera               | Aire                        | 20                                      |                                                  |            |                                                           |           | 6                            | 113                             |
|                |                         | Ruido                       | 12                                      |                                                  |            |                                                           |           | 0                            | 0                               |
|                | Agua                    | Agua superficial            |                                         |                                                  |            |                                                           |           | 3                            | 87                              |
|                |                         | Aguas subterráneas          |                                         |                                                  |            |                                                           |           | 7                            | 181                             |
|                | Suelo                   | Cobertura vegetal           | 53                                      |                                                  |            | 30                                                        |           | 11                           | 379                             |
|                |                         | Calidad del suelo           | 75                                      |                                                  |            | 30                                                        |           | 11                           | 452                             |
|                |                         | Geomorfología               |                                         |                                                  |            | 24                                                        |           | 1                            | 0                               |
|                |                         | Paisajismo                  | 75                                      |                                                  |            | 15                                                        |           | 10                           | 299                             |
|                |                         |                             |                                         |                                                  |            |                                                           |           | <b>49</b>                    | <b>1511</b>                     |
| Medio biótico  | Flora                   | Especies arbóreas           |                                         |                                                  |            |                                                           |           | 2                            | 57                              |
|                |                         | Especies arbustivas menores |                                         |                                                  |            |                                                           |           | 10                           | 205                             |
|                |                         | Flora local                 |                                         |                                                  |            |                                                           |           | 9                            | 164                             |
|                | Fauna                   | Fauna terrestre             |                                         |                                                  |            |                                                           |           | 11                           | 197                             |
|                |                         | Hábitat                     |                                         |                                                  |            |                                                           |           | 10                           | 218                             |
|                |                         |                             |                                         |                                                  |            |                                                           |           | 5                            | 0                               |
|                |                         |                             |                                         |                                                  |            |                                                           |           | <b>47</b>                    | <b>841</b>                      |
| Medio social   | Calidad de vida         | Salud                       | 26                                      |                                                  |            |                                                           |           | 7                            | 130                             |
|                |                         | Empleo                      |                                         | 20                                               |            | 25                                                        |           | 17                           | 45                              |
|                | Aspectos psicológicos   |                             |                                         | 12                                               |            | 15                                                        |           | 12                           | 27                              |
|                | Actividades productivas |                             |                                         | 25                                               |            | 35                                                        |           | 11                           | 25                              |
|                |                         |                             |                                         |                                                  |            |                                                           |           | <b>47</b>                    | <b>227</b>                      |
|                |                         |                             | 249                                     | 57                                               | <b>306</b> | 40                                                        | <b>40</b> |                              | 2962                            |
|                |                         |                             | 12                                      | 0                                                | <b>12</b>  | 0                                                         | <b>0</b>  |                              |                                 |

*Nota. Elaborado por los Autores*

Las actividades agrícolas, especialmente la siembra y el uso de fertilizantes, generan impactos significativos en el suelo y el aire, evidenciados en la alteración de la calidad del suelo y en la emisión de contaminantes. Asimismo, el riego y el almacenamiento de agua inciden en la calidad y disponibilidad del recurso hídrico,

lo que puede afectar su uso sostenible. Estos impactos son predominantemente directos y están asociados a la intervención humana sobre los recursos naturales.

En el componente biótico, se identifican afectaciones en flora y fauna debido a la intensificación de las actividades productivas y al manejo inadecuado de residuos. Estas alteraciones impactan en la biodiversidad y en el equilibrio de los ecosistemas, reduciendo su capacidad de resiliencia frente a perturbaciones ambientales.

Por otro lado, las actividades de monitoreo ambiental permiten identificar de manera temprana los impactos negativos, facilitando la implementación de medidas correctivas. Este proceso contribuye a mejorar la gestión ambiental y a reducir la incertidumbre en la toma de decisiones.

Finalmente, las acciones de remediación generan impactos positivos acumulados, reflejados en la recuperación de la calidad del suelo y del agua, así como en la mejora de las condiciones ambientales generales. Estos resultados permiten establecer un balance ambiental, donde los efectos negativos pueden ser parcialmente compensados, evidenciando la eficacia de las estrategias implementadas y fortaleciendo la resiliencia del sistema.

Tabla 32: Matriz de Leopold del cantón Guamote.

| MEDIO AMBIENTE |            |                    | Siembra de Cultivos     |                                                     |                                  |                                               |              |             |
|----------------|------------|--------------------|-------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------------|--------------|-------------|
| MEDIO          | COMPONENTE | FACTOR AMBIENTAL   | Preparación del terreno | Aplicación de fertilizantes orgánicos e inorgánicos | Señalización del área de siembra | Tratamiento y disposición de desechos sólidos |              |             |
|                |            |                    |                         |                                                     |                                  | orgánicos                                     |              | inorgánicos |
|                |            |                    |                         |                                                     |                                  | Residuos orgánicos                            | incineración |             |
| Medio Físico   | ATMOSFERA  | AIRE               | 28                      |                                                     | 18                               | 17                                            | 27           | 13          |
|                |            | RUIDO              | 10                      |                                                     |                                  |                                               | 15           |             |
|                | AGUA       | AGUA SUPERFICIAL   | 32                      |                                                     |                                  |                                               |              |             |
|                |            | AGUAS SUBTERRANEAS |                         |                                                     |                                  |                                               |              |             |

|               |                         |                             |    |    |    |    |    |    |
|---------------|-------------------------|-----------------------------|----|----|----|----|----|----|
|               | SUELO                   | COBERTURA VEGETAL           | 22 |    | 26 | 21 |    | 27 |
|               |                         | CALIDAD DEL SUELO           | 16 |    | 25 | 37 | 20 |    |
|               |                         | GEOMORFOLOGIA               | 17 |    |    |    |    |    |
|               |                         | PAISAJISMO                  | 18 | 14 | 24 | 20 | 19 | 21 |
| Medio Biótico | FLORA                   | ESPECIES ARBOREAS           | 10 | 18 |    |    |    |    |
|               |                         | ESPECIES ARBUSTIVAS MENORES | 26 |    |    |    |    |    |
|               |                         | FLORA LOCAL                 | 26 |    |    |    |    |    |
|               | FAUNA                   | FAUNA TERRESTRE             | 20 |    |    | 18 | 17 |    |
|               |                         | HABITAT                     | 20 | 17 | 24 |    |    |    |
|               |                         |                             |    |    |    |    |    |    |
| Medio Social  | CALIDAD DE VIDA         | SALUD                       | 15 | 20 | 16 | 15 | 33 | 15 |
|               |                         | EMPLEO                      |    |    |    |    |    |    |
|               | ASPECTOS PSICOLOGICOS   |                             |    |    |    |    |    |    |
|               | ACTIVIDADES PRODUCTIVAS |                             |    |    |    |    |    |    |

|     |    |    |    |     |    |            |
|-----|----|----|----|-----|----|------------|
| 0   | 0  | 48 | 96 | 0   | 63 | <b>207</b> |
| 244 | 49 | 85 | 17 | 116 | 13 | <b>524</b> |

| MEDIO AMBIENTE |            |                    |                                  |                                                |                        | Riego de Cultivos  |                   |                        |                                   | Area de Ganadería |    |    |    |
|----------------|------------|--------------------|----------------------------------|------------------------------------------------|------------------------|--------------------|-------------------|------------------------|-----------------------------------|-------------------|----|----|----|
| MEDIO          | COMPONENTE | FACTOR AMBIENTAL   | Preparación del sistema de riego | Riego de cultivos por dispersión y escurrentia | Almacenamiento de agua | Área de Abrevadero | Área de comederos | Almacenamiento de agua | Recolección de desechos orgánicos |                   |    |    |    |
| Medio Físico   | ATMOSFERA  | AIRE               | 22                               | 14                                             | 26                     |                    | 25                | 21                     | 25                                |                   |    |    |    |
|                |            | RUIDO              | 10                               |                                                |                        | 22                 | 16                |                        |                                   | 15                | 12 | 22 |    |
|                | AGUA       | AGUA SUPERFICIAL   | 27                               | 22                                             | 23                     | 24                 | 34                | 23                     |                                   | 25                | 32 |    | 30 |
|                |            | AGUAS SUBTERRANEAS | 33                               | 33                                             | 10                     | 38                 | 38                | 36                     | 39                                |                   |    |    |    |
|                | SUELO      | COBERTURA VEGETAL  | 27                               | 28                                             |                        | 24                 | 27                | 26                     |                                   |                   |    |    |    |
|                |            | CALIDAD DEL SUELO  | 39                               | 33                                             | 18                     |                    |                   |                        |                                   |                   |    |    |    |
|                |            | GEOMORFOLOGIA      |                                  |                                                |                        |                    |                   |                        |                                   |                   |    |    |    |
|                |            | PAISAJISMO         | 40                               | 42                                             |                        |                    |                   |                        |                                   |                   |    |    |    |
| Medio Biotico  | FLORA      | ESPECIES ARBOREAS  | 29                               | 28                                             |                        |                    |                   |                        |                                   |                   |    |    |    |

|              |                         |                             |    |    |    |    |    |    |    |    |
|--------------|-------------------------|-----------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Medio Social | FAUNA                   | ESPECIES ARBUSTIVAS MENORES | 34 | 28 | 27 |    |    | 27 | 18 | 34 |
|              |                         | FLORA LOCAL                 | 35 | 17 | 27 |    |    | 27 | 18 |    |
|              |                         | FAUNA TERRESTRE             |    | 22 | 26 | 22 | 20 | 22 | 26 |    |
|              |                         | HABITAT                     | 22 | 24 |    | 24 | 24 | 24 | 36 |    |
|              |                         |                             |    |    |    |    |    |    |    |    |
|              | CALIDAD DE VIDA         | SALUD                       | 10 | 21 | 25 | 14 | 16 | 18 | 23 |    |
|              |                         | EMPLEO                      |    |    |    |    |    |    |    |    |
|              | ASPECTOS PSICOLOGICOS   |                             |    |    |    |    |    |    |    |    |
|              | ACTIVIDADES PRODUCTIVAS |                             |    |    |    |    |    |    |    |    |
|              |                         |                             |    |    |    |    |    |    |    |    |

|     |     |    |            |     |     |     |     |            |
|-----|-----|----|------------|-----|-----|-----|-----|------------|
| 318 | 298 | 80 | <b>696</b> | 157 | 254 | 188 | 213 | <b>812</b> |
| 10  | 14  | 92 | <b>116</b> | 22  | 16  | 0   | 0   | <b>38</b>  |

| MEDIO AMBIENTE |            |                             | Transporte | Identificación de puntos de Remedación | Certificación de Seguimiento y Documentación del proyecto |                              |                                 |
|----------------|------------|-----------------------------|------------|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| MEDIO          | COMPONENTE | FACTOR AMBIENTAL            |            |                                        |                                                           | NÚMERO DE IMPACTOS POSITIVOS | SUMATORIA DE IMPACTOS POSITIVOS |
| Medio Físico   | ATMOSFERA  | AIRE                        | 26         | 20                                     |                                                           | 6                            | 113                             |
|                |            | RUIDO                       | 27         | 12                                     |                                                           | 0                            | 0                               |
|                | AGUA       | AGUA SUPERFICIAL            |            |                                        |                                                           | 3                            | 87                              |
|                |            | AGUAS SUBTERRANEAS          |            |                                        |                                                           | 7                            | 181                             |
|                | SUELO      | COBERTURA VEGETAL           |            | 53                                     | 30                                                        | 11                           | 379                             |
|                |            | CALIDAD DEL SUELO           |            | 75                                     | 30                                                        | 11                           | 452                             |
|                |            | GEOMORFOLOGIA               |            |                                        | 24                                                        | 1                            | 0                               |
|                |            | PAISAJISMO                  |            | 75                                     | 15                                                        | 10                           | 299                             |
|                |            |                             |            |                                        |                                                           | <b>49</b>                    | <b>1511</b>                     |
|                |            |                             |            |                                        |                                                           |                              |                                 |
| Medio Biótico  | FLORA      | ESPECIES ARBOREAS           |            |                                        |                                                           | 2                            | 57                              |
|                |            | ESPECIES ARBUSTIVAS MENORES |            |                                        |                                                           | 10                           | 205                             |
|                |            | FLORA LOCAL                 |            |                                        |                                                           | 9                            | 164                             |
|                | FAUNA      | FAUNA TERRESTRE             |            |                                        |                                                           | 11                           | 197                             |
|                |            | HABITAT                     |            |                                        |                                                           | 10                           | 218                             |
|                |            |                             |            |                                        |                                                           |                              |                                 |

|              |                         |        |     |    |    |    |    |    |     |
|--------------|-------------------------|--------|-----|----|----|----|----|----|-----|
| Medio Social |                         |        |     |    |    |    |    | 5  | 0   |
|              |                         |        |     |    |    |    |    | 47 | 841 |
|              | CALIDAD DE VIDA         | SALUD  |     |    | 26 |    |    | 7  | 130 |
|              |                         | EMPLEO |     |    |    | 20 | 25 | 17 | 45  |
|              | ASPECTOS PSICOLOGICOS   |        |     |    |    | 12 | 15 | 12 | 27  |
|              | ACTIVIDADES PRODUCTIVAS |        |     |    |    | 25 | 35 | 11 | 25  |
|              |                         |        |     |    |    |    |    |    | 47  |
| 33           |                         |        |     |    |    |    |    |    | 296 |
| 9            | 562                     | 56     | 249 | 57 | 30 | 40 | 4  |    | 2   |
|              |                         | 2      |     |    | 6  |    | 0  |    |     |
| 16           | 27                      | 27     | 12  | 0  | 12 | 0  | 0  |    |     |

El impacto ambiental producido por la caída de ceniza en el cantón Guamote está estrechamente ligado al medio socioeconómico por sobre el biótico y abiótico; muchos de los agricultores del cantón no tienen conocimiento sobre el correcto uso del suelo para la agricultura, la ceniza actúa como un agente desinfectante, que, en controlada proporción puede beneficiar en la producción agrícola, sin embargo, cuando se mantiene constante y no se aplican remociones de ella produce impactos negativos sobre la biomasa local, también es importante considerar que en la gran mayoría de agricultores de la Matriz, Cebadas y Palmira poseen ganado, el 70% de los encuestados mencionaron que sus ganados consumen el agua en abrevaderos descubiertos. Esto puede repercutir en la adquisición de enfermedades digestivas y respiratorias, por ello se recomienda controlar mejor el agua de esos abrevaderos, con un sistema de reposición y limpieza de los mismos, con periodicidad de 5 veces por semana al existir caída de ceniza.

La ceniza posee componentes variables, dependientes de cada erupción, ninguna caída de ceniza será igual que otra, por ello, está previsto que el medio biótico sea el principal afectado además del socioeconómico, al existir pérdidas de cultivos y de ganado ocasiona un déficit en el ingreso mensual de los agricultores que viven el día a día de ellos. El 80% de los agricultores del cantón son dependientes de sus productos agrícolas, es decir, apenas el 20% de ellos los tienen como consumo exclusivo para ellos mismos.

En conjunto, las matrices de Leopold aplicadas en los cantones Riobamba, Alausí, Guamote y Chunchi permiten evidenciar la complejidad de las

interacciones entre las actividades antrópicas, los fenómenos naturales y los componentes ambientales. Los resultados obtenidos reflejan que los impactos no se presentan de forma aislada, sino como parte de un sistema dinámico en el que el suelo, el agua, el aire y los elementos bióticos se encuentran estrechamente interrelacionados, generando efectos acumulativos que inciden directamente en la sostenibilidad del entorno.

De manera particular, el componente suelo se identifica como el más vulnerable frente a la presencia de metales pesados y a las prácticas productivas intensivas, evidenciando procesos de degradación que afectan su capacidad funcional. Esta situación repercute no solo en la productividad agrícola, sino también en la estabilidad de los ecosistemas, al alterar los ciclos naturales de nutrientes y la biodiversidad edáfica, lo que compromete la resiliencia ambiental a mediano y largo plazo.

En relación con el recurso hídrico, los resultados muestran que las actividades agrícolas, ganaderas y la deposición de ceniza volcánica influyen en la calidad del agua, generando riesgos tanto para los ecosistemas acuáticos como para el consumo humano. La posible movilidad de contaminantes a través de procesos de lixiviación y escorrentía refuerza la necesidad de implementar medidas de control que permitan proteger este recurso estratégico.

En el ámbito biótico y socioeconómico, los impactos identificados evidencian una afectación directa en la biodiversidad, la salud de los animales y la calidad de vida de la población. La disminución de la productividad, junto con las alteraciones en los sistemas productivos y en las condiciones de vida, pone de manifiesto la estrecha relación entre el deterioro ambiental y el bienestar humano, lo que exige un enfoque integral en la gestión del territorio.

Finalmente, los resultados también destacan el papel fundamental de las estrategias de monitoreo y remediación ambiental, las cuales permiten no solo identificar los impactos, sino también generar efectos positivos orientados a la

recuperación de los ecosistemas. En este sentido, la aplicación de la matriz de Leopold se consolida como una herramienta clave para la toma de decisiones, facilitando la formulación de políticas y acciones que promuevan un equilibrio entre el desarrollo productivo y la conservación ambiental.

La evaluación de impactos ambientales se desarrolló mediante la aplicación de una Matriz de Leopold semicuantitativa, en la cual se analizaron las interacciones entre las acciones derivadas de la deposición de ceniza volcánica y los principales componentes del sistema agrícola. La matriz permitió jerarquizar los efectos potenciales a partir de la valoración conjunta de magnitud e importancia.

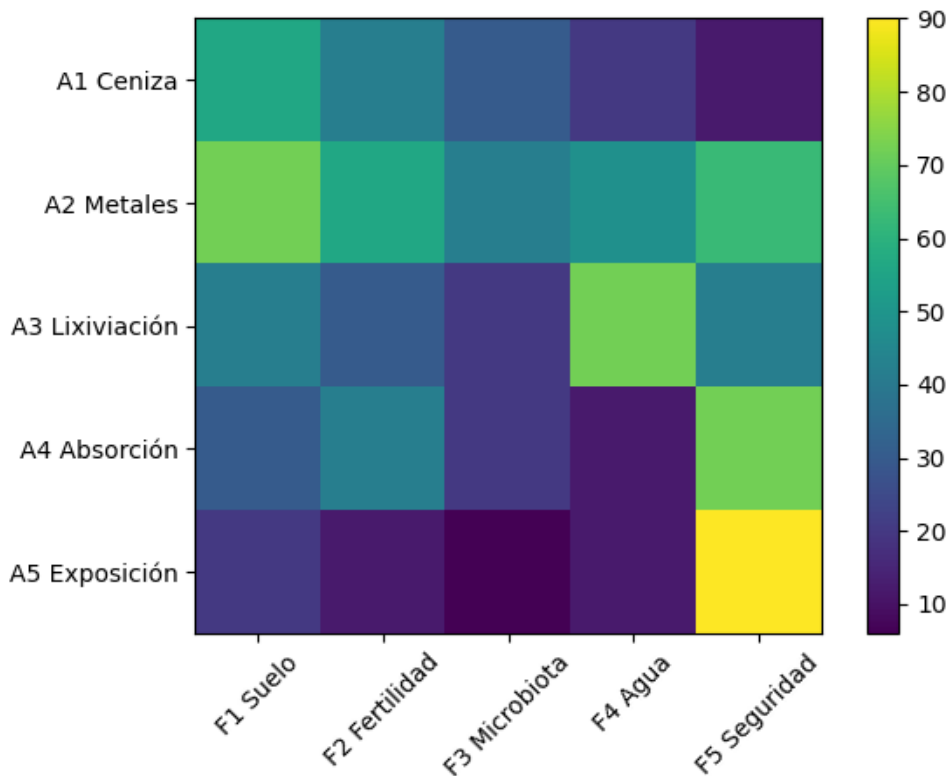


Figura 10: Matriz de Leopold aplicada al sistema agrícola bajo influencia volcánica.

Nota. Elaborado por los Autores



La Figura 14 muestra la matriz aplicada al sistema agrícola de los cantones evaluados, evidenciando que los mayores valores de impacto se concentran en las interacciones relacionadas con la acumulación de metales en el suelo y la posible transferencia hacia los cultivos.

Los resultados indican que la acción “incorporación y acumulación de metales en el horizonte superficial” presenta el mayor impacto global dentro del sistema evaluado, particularmente sobre la calidad fisicoquímica del suelo y la seguridad alimentaria. Esta tendencia es coherente con los resultados analíticos obtenidos en los apartados anteriores, donde se identificó presencia detectable de níquel y arsénico, aunque en concentraciones bajas.

Asimismo, la movilización por lixiviación muestra impactos moderados sobre el recurso hídrico, especialmente en escenarios donde las condiciones de pH y conductividad podrían favorecer la solubilidad de ciertos elementos traza. Sin embargo, la ausencia de concentraciones elevadas de cadmio, plomo y mercurio reduce la probabilidad de impactos severos en el corto plazo.

En términos generales, la matriz evidencia que el sistema agrícola presenta una condición de impacto bajo a moderado, con mayor sensibilidad en los componentes vinculados a la cadena alimentaria. Esto confirma que, aunque no se registran niveles críticos de contaminación, el sistema no debe considerarse completamente exento de riesgo, especialmente bajo escenarios de deposición continua de ceniza volcánica.

### **3.8 Evaluación integrada del riesgo ambiental**

La evaluación integrada del riesgo ambiental se fundamentó en la articulación de los resultados fisicoquímicos del suelo, las concentraciones de metales pesados, el análisis de transferencia suelo-planta y la valoración estructurada de impactos mediante la Matriz de Leopold.

Los análisis químicos demostraron que cadmio, plomo y mercurio se encuentran por debajo del límite de detección en todas las muestras evaluadas, lo

que sugiere ausencia de contaminación significativa por estos elementos. El níquel presentó concentraciones entre 3,41 y 6,98 ppm, mientras que el arsénico alcanzó valores máximos de 0,40 ppm en algunas muestras, sin superar límites normativos establecidos para suelos agrícolas.

Desde la perspectiva edáfica, los valores de pH predominantemente neutros a ligeramente alcalinos favorecen la adsorción y retención de metales en la fracción coloidal del suelo, disminuyendo su biodisponibilidad inmediata. La capacidad de intercambio catiónico moderada a alta en varias muestras también contribuye a la retención de cationes metálicos, reduciendo su movilidad vertical.

El análisis de biomasa vegetal mostró que la mayoría de los metales evaluados se mantienen en concentraciones bajas en raíces, parte aérea y fruto, lo que sugiere limitada transferencia hacia órganos comestibles. No obstante, se registraron valores elevados de sodio en raíces y parte aérea, lo que podría estar asociado a procesos de acumulación iónica más que a contaminación metálica.

Integrando todos los componentes analizados, el riesgo ambiental actual puede clasificarse como bajo a moderado, condicionado principalmente por la persistencia del volcanismo activo y la posibilidad de deposición continua de ceniza. El sistema agrícola evaluado no presenta evidencias de contaminación crítica; sin embargo, la evaluación preventiva indica la necesidad de monitoreo periódico, especialmente en lo referente a arsénico y níquel.

En consecuencia, la dinámica geoquímica observada responde más a procesos naturales asociados al material volcánico que a un escenario de degradación ambiental severa. La gestión sostenible del territorio deberá enfocarse en vigilancia técnica continua, manejo adecuado del suelo y seguimiento de la calidad de cultivos destinados al consumo humano.

## CAPÍTULO IV

### IV. DISCUSIÓN E INTERPRETACIÓN INTEGRADA DE RESULTADOS

En este capítulo se detallará la discusión de los hallazgos requiere trascender la descripción analítica de concentraciones y diferencias estadísticas, para interpretar los resultados dentro de la dinámica geoquímica propia de sistemas volcánico-agrícolas activos. En estos contextos, la ceniza volcánica actúa de forma dual: por una parte, puede enriquecer el suelo con bases y nutrientes, y por otra, introducir elementos traza potencialmente tóxicos cuya relevancia ambiental depende menos de su presencia total y más de su fracción biodisponible. En consecuencia, el eje interpretativo central del presente estudio sostiene que el “riesgo” no se define únicamente por la detección de metales en el suelo, sino por la interacción entre (i) propiedades edáficas reguladoras pH, capacidad de intercambio catiónico (CIC), materia orgánica (MO), textura y salinidad, (ii) procesos de movilización (lixiviación y especiación) y (iii) transferencia efectiva hacia la biomasa, especialmente hacia órganos comestibles.

La inclusión territorial de Guamote, Riobamba, Alausí y Chunchi constituye una fortaleza analítica porque evita generalizaciones y permite observar que el impacto volcánico no es homogéneo: se expresa como un mosaico geoquímico condicionado por altitud, edafoclima, uso del suelo, intensidad de deposición y prácticas agrícolas locales. Así, el análisis inter-cantonal no solo describe diferencias, sino que aporta evidencia para discutir mecanismos, controles dominantes y posibles trayectorias de riesgo en el tiempo.

Con base en esta lógica sistémica, se propone el siguiente modelo conceptual integrado que resume las interacciones entre fuente volcánica, propiedades edáficas, procesos geoquímicos, transferencia suelo-planta y riesgo ambiental.

#### **4.1 Dinámica geoquímica en suelos volcánicos andinos: estabilidad aparente y complejidad subyacente**

En términos generales, las concentraciones de metales pesados en suelos agrícolas se mantuvieron por debajo de límites guía usados comúnmente para suelos agrícolas, incluyendo normativa nacional y referencias internacionales. Sin embargo, interpretar este resultado únicamente como “ausencia de riesgo” sería una lectura incompleta, porque los sistemas volcánicos se caracterizan por (i) alta variabilidad espacial, (ii) deposición intermitente y (iii) cambios progresivos en la línea base geoquímica. En otras palabras, el cumplimiento normativo describe el estado actual, pero no necesariamente captura el comportamiento del sistema bajo escenarios de deposición recurrente.

Los suelos volcánicos andinos suelen exhibir elevada capacidad de retención por la presencia de fases minerales y óxidos de Fe y Al, además de complejación con materia orgánica. Esta condición puede generar una “estabilidad aparente” al inmovilizar metales en fracciones adsorbidas; sin embargo, dicha estabilidad es dinámica y condicional (Tanneberg & Jahn, n.d.). Cambios relativamente pequeños en pH, salinidad, humedad o carbono orgánico pueden alterar la especiación y movilización de elementos traza. Estudios en ambientes volcánicos internacionales reportan patrones consistentes con esta interpretación: suelos con niveles totales moderados pueden presentar incrementos de biodisponibilidad bajo acidificación, cambios redox o alteración del balance iónico (Shahid et al., 2025).

En este estudio, la evidencia de variabilidad por cantón (pH, MO, CIC, textura, aniones y elementos intercambiables) sugiere que el comportamiento geoquímico no está controlado por un único factor, sino por un conjunto de controles edáficos y de manejo. Por ello, el énfasis interpretativo debe centrarse en identificar qué “control dominante” opera en cada cantón: control edáfico

(pH/MO/CIC/textura), control salino/iónico ( $\text{Na}-\text{Cl}-\text{SO}_4$ ), o control litogénico/volcánico (aporte mineral diferencial).

## **4.2 Variabilidad fisicoquímica: lectura mecanística del pH, MO, textura, densidades y CIC**

Los valores de pH mostraron un patrón territorial relevante como la Figura resume gráficamente la variabilidad inter-cantonal de variables clave, destacando diferencias en pH, MO, Na, Ni, As, nitratos y sulfatos.: Riobamba registró un pH predominantemente alcalino, mientras que Alausí–Chunchi y Guamote se ubicaron entre condiciones ligeramente ácidas a neutras, con mayor variabilidad interna. Esta diferencia no es menor: el pH es uno de los reguladores más influyentes en la movilidad de metales como Ni y As, y también condiciona la disponibilidad de micronutrientes. En términos generales, ambientes alcalinos favorecen la adsorción/precipitación de muchos metales y pueden reducir la biodisponibilidad; sin embargo, esta regla se modula por otros factores como la presencia de ligandos orgánicos, la fuerza iónica y los aniones dominantes (Puttaswamy & Liber, 2012).

La materia orgánica presentó mayor amplitud y promedio superior en Alausí–Chunchi, lo cual puede interpretarse como una condición de mayor capacidad de complejación y retención de elementos traza, a la vez que sugiere heterogeneidad en prácticas agrícolas (aportes orgánicos, residuos, pendiente/erosión, microclimas) (Dyson et al., 2024). En Guamote, el rango más estrecho y valores menores sugieren menor amortiguación orgánica; esto es relevante porque suelos con menor MO pueden ser más sensibles a cambios en movilidad iónica cuando varía el pH o se intensifica la lixiviación.

En relación con la textura, el predominio franco arenoso/arenoso en Guamote y Alausí–Chunchi sugiere mayor permeabilidad y potencial de lixiviación, mientras que texturas más finas (franco/franco limoso) como las registradas en Riobamba tienden a favorecer retención de cationes y mayor estabilidad estructural química (Dyson et al., 2024). Estas diferencias texturales

ofrecen una base mecanística para discutir por qué algunos iones y elementos pueden mantenerse en solución o desplazarse verticalmente en unos cantones más que en otros.

Las densidades real y aparente también aportan un componente físico a la interpretación: Guamote presentó densidades más altas, consistentes con texturas más gruesas, menor agregación y potencialmente menor contenido de materia orgánica (Enemo et al., 2025). Esto puede relacionarse con una menor capacidad de amortiguación química y menor retención de agua, lo cual no solo influye en fertilidad sino también en el comportamiento geoquímico de metales bajo pulsos de lluvia o deposición de ceniza (Joshi et al., 2026).

Aunque la CIC no mostró diferencias significativas entre cantones en términos estadísticos, su amplitud en especial en Riobamba sugiere heterogeneidad interna importante. En escenarios donde coexisten pH alto, elevada CIC y altas concentraciones de Na, la discusión debe incorporar no solo la “retención” como mecanismo positivo, sino también el riesgo de sodificación y desplazamiento iónico, que puede afectar estructura del suelo y la movilidad de ciertos elementos por competencia iónica (Zhang et al., 2021).

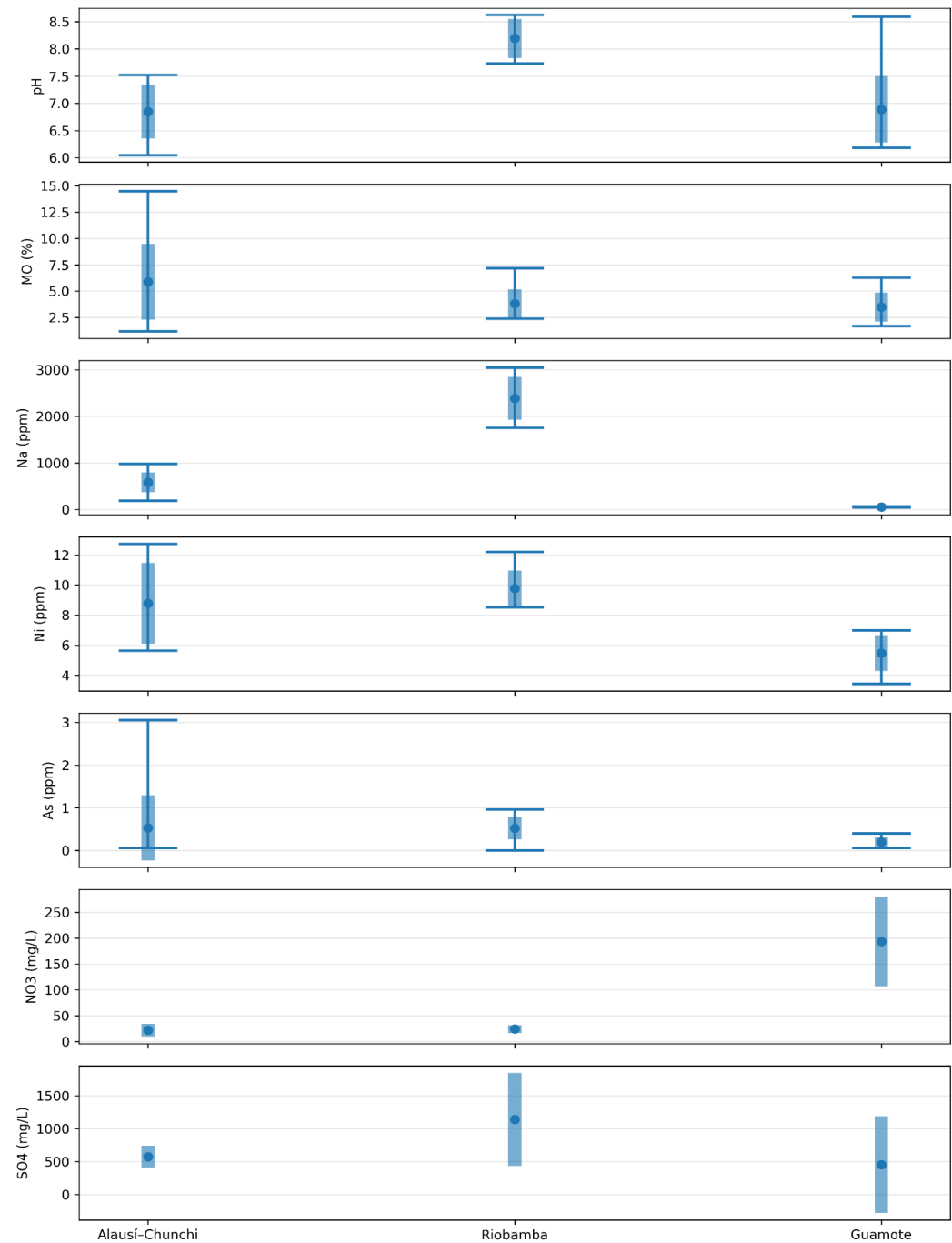


Figura 11: Variabilidad inter-cantonal de variables edáficas y metálicas (media±DE; mínimo–máximo).

Nota. Elaborado por los Autores

### 4.3 Macronutrientes y elementos intercambiables: señales edáficas versus señales de manejo agrícola

El comportamiento de C, N y la relación C/N muestra un patrón que requiere discusión crítica, porque los resultados sugieren contrastes muy marcados entre cantones. Alausí–Chunchi presenta mayor carbono, mientras Riobamba registra un valor extremadamente bajo de C y, simultáneamente, un N promedio alto. Este contraste podría tener varias interpretaciones: diferencias metodológicas (por ejemplo, carbono orgánico vs total, o reporte en unidades distintas), heterogeneidad extrema del material orgánico, o incluso un problema de coherencia analítica que debe ser revisado para asegurar comparabilidad (Dyson et al., 2024). Si los datos se confirman, la interpretación ecológica sería inusual para un suelo agrícola, por lo que el texto debe reconocer explícitamente esta señal como un punto crítico y proponer su verificación mediante repetición analítica o revisión de unidades.

Más allá de C y N, el fósforo disponible mostró valores muy altos en Riobamba y Alausí–Chunchi frente a Guamote. Este patrón es coherente con una combinación de manejo agrícola (fertilización fosfatada) y diferencias en retención edáfica. En suelos volcánicos, el P puede quedar fuertemente adsorbido a óxidos de Fe/Al; por ello, niveles altos de P disponible pueden indicar aplicaciones repetidas, dinámica de pH y competencia aniónica con fosfatos, o diferencias en mineralogía y saturación de sitios de adsorción (Rechberger et al., 2021). La Figura 12 integra estas relaciones mediante una matriz estandarizada que permite visualizar el patrón diferencial entre cantones



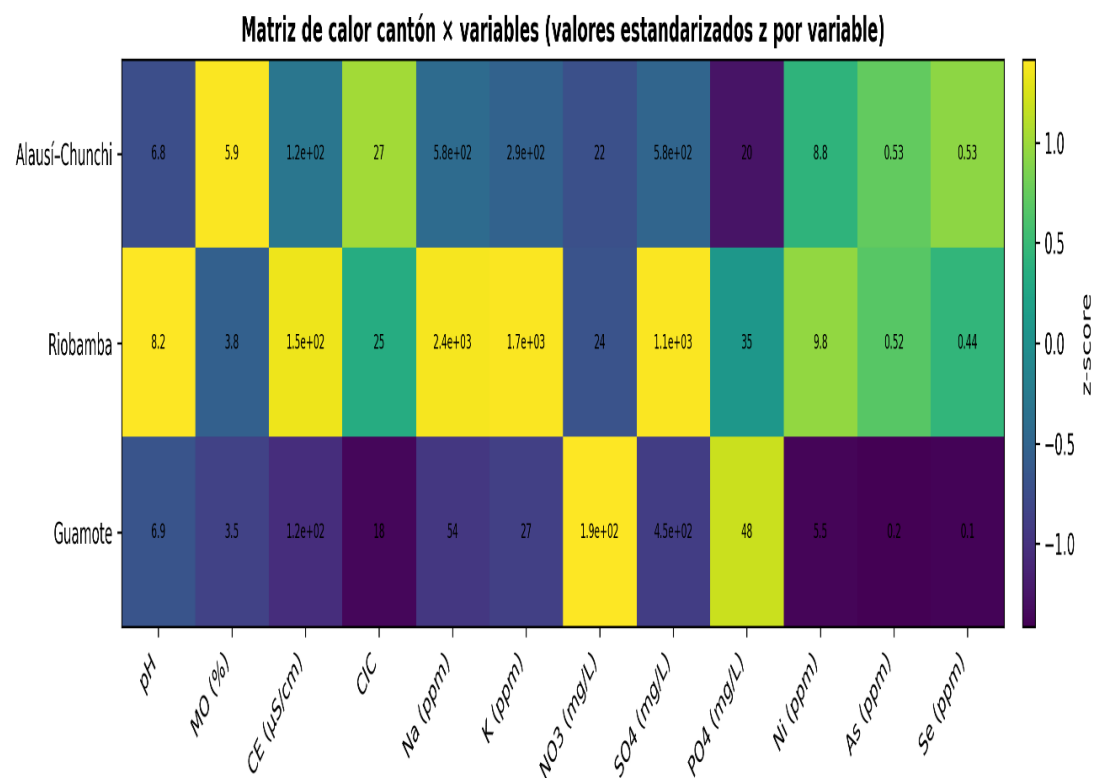


Figura 12: Matriz de calor cantón x variables (valores estandarizados z).  
Nota. Elaborado por los Autores

El hallazgo más distintivo en elementos intercambiables es el Na marcadamente elevado en Riobamba, acompañado de K también muy alto. Esta combinación debe discutirse como posible indicador de salinidad/sodicidad relativa o de aportes antrópicos asociados a fertilización, enmiendas o riego. Aunque la conductividad eléctrica promedio no mostró diferencias significativas, la química iónica sugiere que el sistema podría tener procesos de concentración salina local (microzonas) o manejo diferenciado (Wendemeneh et al., 2024). La discusión debe incorporar que el Na, además de ser un ion móvil, puede afectar estructura del suelo (dispersión de arcillas) y modificar la disponibilidad de otros elementos por competencia en sitios de intercambio. Desde una perspectiva de riesgo indirecto, altos Na/K pueden no ser “toxicidad metálica”, pero sí un factor

de degradación del suelo que, a mediano plazo, influye en la movilización de metales y en la productividad (Levy & Bar-Tal, 2023).

#### **4.3.1 Sodio, cloruros y sulfatos: señales de salinidad y posibles implicaciones geoquímicas**

Uno de los hallazgos más relevantes del estudio corresponde a las concentraciones marcadamente elevadas de sodio (Na) registradas en Riobamba, acompañadas de niveles altos de cloruros ( $\text{Cl}^-$ ) y sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ). Aunque la conductividad eléctrica promedio no mostró diferencias estadísticamente significativas entre cantones, la composición iónica sugiere la existencia de procesos locales de concentración salina o de manejo agrícola diferenciado.

Desde una perspectiva edáfica, el sodio intercambiable puede afectar la estabilidad estructural del suelo al inducir dispersión de arcillas y reducción de agregación, lo que incrementa la susceptibilidad a erosión y modifica la dinámica de infiltración. En sistemas volcánicos, donde la estructura del suelo depende fuertemente de agregados orgánico-minerales, un incremento sostenido de sodio puede alterar indirectamente la capacidad de retención de metales al modificar la superficie específica y los sitios activos de intercambio.

La coexistencia de Na elevado con concentraciones altas de sulfatos puede estar asociada tanto a aportes volcánicos (cenizas ricas en compuestos sulfurados) como a fertilización agrícola (sulfatos de amonio u otras fuentes). Desde el punto de vista geoquímico, una mayor fuerza iónica en solución puede influir en la competencia por sitios de adsorción, alterando el equilibrio entre cationes metálicos y la fracción coloidal del suelo.

En este sentido, aunque los metales pesados evaluados no superan límites normativos, la química iónica observada indica que el sistema podría experimentar cambios en movilidad bajo escenarios de intensificación agrícola o eventos pluviométricos extremos. La discusión, por tanto, debe reconocer que la salinidad

relativa no constituye un problema toxicológico inmediato, pero sí un factor modulador del comportamiento geoquímico futuro.

#### **4.4 Micronutrientes (Mn, Fe, Cu, Zn): firma geoquímica territorial y plausibles efectos de matriz**

Los micronutrientes mostraron diferencias inter-cantoniales notables, especialmente para Mn y Fe. Alausí–Chunchi presentó valores muy elevados y con gran dispersión, mientras Guamote registró valores marcadamente bajos. Este contraste requiere una lectura crítica: en suelos volcánicos, Fe y Mn pueden reflejar tanto la composición del material parental y ceniza como procesos pedogenéticos y condiciones redox (Jiang et al., 2021). Altos Fe/Mn pueden asociarse a mineralogía rica en óxidos y a la propia huella del aporte volcánico, pero también pueden verse influenciados por el método de extracción/medición y por la matriz (por ejemplo, si se trata de contenido total o fracción extraíble) (M. et al., 2025).

Desde el punto de vista edáfico, estas diferencias tienen implicaciones directas: el Fe y Mn influyen en la adsorción de As y otros elementos traza, por lo que cantones con mayores óxidos podrían presentar mayor capacidad de retención de As en fracciones sólidas. Sin embargo, esa retención no elimina el riesgo; solo sugiere que la biodisponibilidad depende de cambios de pH, competencia aniónica y condiciones redox (Yang et al., 2024). La discusión debe explicitar este punto para reforzar la lógica: el suelo puede actuar como sumidero geoquímico hoy, pero bajo perturbaciones puede comportarse como fuente.

En Cu, aunque no hubo diferencias significativas, el rango en Guamote (incluyendo valores muy bajos) sugiere heterogeneidad interna o menor aporte; en Zn sí existe diferenciación entre cantones. Esto puede relacionarse con manejo agrícola (fertilizantes/micronutrientes), composición de ceniza o propiedades del suelo (Zia et al., 2018). Comparaciones con literatura nacional e internacional pueden reforzar que suelos volcánicos muestran patrones muy variables y que, por

ello, las medias cantonales deben interpretarse con cautela, enfatizando la dispersión como parte de la realidad geoquímica territorial.

#### **4.5 Micronutrientes (Fe y Mn) como moduladores de retención de arsénico**

Las diferencias inter-cantoniales en hierro (Fe) y manganeso (Mn) representan un componente estructural clave en la interpretación de la movilidad de arsénico y otros elementos traza. En Alausí–Chunchi y Riobamba se registraron concentraciones considerablemente superiores de Fe en comparación con Guamote, lo cual sugiere mayor presencia de óxidos y fases minerales capaces de adsorber arseniatos y otros aniones metálicos.

La literatura geoquímica establece que el arsénico presenta alta afinidad por superficies de óxidos de hierro y manganeso, especialmente en condiciones de pH neutro a ligeramente ácido. En consecuencia, suelos con mayores contenidos de Fe y Mn tienden a actuar como sumideros geoquímicos, reduciendo la fracción libre en solución. Esta relación podría explicar por qué las concentraciones de As en suelo se mantienen bajas y relativamente estables en los cantones con mayor contenido de Fe.

No obstante, este mecanismo de retención no es absoluto. Cambios en pH, condiciones redox o competencia aniónica (por ejemplo, altos niveles de fosfato) pueden inducir procesos de desorción. Por ello, la elevada concentración de Fe observada debe interpretarse como un factor protector actual, pero no como garantía permanente de inmovilización.

El contraste extremo en Fe entre cantones también requiere revisión crítica de unidades y consistencia analítica, dado que diferencias de varios órdenes de magnitud podrían reflejar condiciones litogénicas reales o, alternativamente, variaciones metodológicas. La incorporación de este análisis crítico fortalece la coherencia científica del capítulo.

#### **4.6 Metales pesados en suelo: interpretación de “no detección”, hotspots y comparación con umbrales**

Los resultados muestran que Cd y Hg permanecieron por debajo de los límites de detección en todas las muestras, y que Pb fue mayoritariamente no detectable salvo detecciones cuantificables en Alausí–Chunchi. Este hallazgo debe discutirse como evidencia importante: sugiere que, en el estado actual, no existe una carga significativa de estos elementos en el suelo agrícola evaluado, lo cual es consistente con escenarios dominados por aporte geogénico volcánico sin contribución antropogénica intensa de metales altamente tóxicos (Tang et al., 2025). Sin embargo, la discusión debe reconocer el papel del límite de detección: la “no detección” no equivale a “cero”, sino a “por debajo del umbral analítico”, y por tanto define un rango posible de concentración.

En Ni, As y Se, la presencia cuantificable y su variabilidad inter-cantonal reflejan dos aspectos: un componente geogénico (material parental/ceniza) y un control edáfico. Riobamba mostró Ni promedio mayor, mientras Guamote presentó valores menores. Este patrón es interesante porque Riobamba, pese a pH alcalino, presenta Ni más alto, lo cual sugiere que el control dominante podría ser la carga litogénica o el aporte específico de ceniza, más que la movilidad (Wang et al., 2023). La discusión debe diferenciar claramente: “concentración total” no es sinónimo de “riesgo”, pero sí constituye la base sobre la cual la biodisponibilidad puede aumentar si cambian las condiciones.

Para fortalecer la interpretación, es recomendable incorporar una lectura relativa respecto a umbrales: no basta con afirmar que los valores están por debajo de límites, sino discutir qué implica estar “muy por debajo” y en qué medida se acerca (o no) a valores guía. También conviene incluir que los umbrales normativos suelen estar diseñados para contaminación antropogénica y no capturan completamente escenarios volcánicos donde la línea base natural puede ser distinta.

En el caso del Pb detectado solo en Alausí–Chunchi, el texto debe proponer hipótesis: influencia diferencial de deposición, proximidad a fuentes antrópicas (vías, combustión, actividades locales), o mayor afinidad de retención por fracciones finas y materia orgánica (Das et al., 2018). Esta discusión de “hotspots” eleva la calidad científica porque muestra que el sistema no es homogéneo y que la ausencia de detección en un cantón no invalida presencia puntual en otro

#### **4.6.1 Comparación porcentual respecto a umbrales**

Para interpretar el significado ambiental de las concentraciones medidas, resulta útil expresar cada metal como porcentaje del valor guía para suelos agrícolas. Esta lectura es especialmente pertinente en escenarios volcánicos, porque permite evaluar cuán “ceranos” o “lejanos” se encuentran los niveles observados respecto a un umbral de referencia, evitando interpretaciones binarias (cumple/no cumple). En este estudio se consideraron los criterios de calidad para suelo agrícola del marco nacional, donde se establecen valores guía para As (5 mg/kg), Cd (0,5 mg/kg), Hg (0,1 mg/kg), Ni (20 mg/kg), Pb (25 mg/kg) y Se (1 mg/kg).

Bajo este enfoque, el Níquel (Ni) presentó promedios cantonales de 8,78 ppm (Alausí–Chunchi), 9,77 ppm (Riobamba) y 5,47 ppm (Guamote), equivalentes aproximadamente a 44%, 49% y 27% del valor guía (20 ppm), respectivamente. Esta magnitud sugiere un enriquecimiento moderado dentro de un rango compatible con suelo agrícola, pero suficientemente alto como para justificar vigilancia preventiva, considerando que la biodisponibilidad puede incrementarse si el sistema edáfico cambia.

En el caso del Arsénico (As), los promedios de 0,53 ppm (Alausí–Chunchi), 0,52 ppm (Riobamba) y 0,20 ppm (Guamote) representan cerca de 11%, 10% y 4% del valor guía (5 ppm). Aunque estos porcentajes son bajos, el arsénico requiere atención especial porque su exposición se define más por especiación y movilidad que por el contenido total; además, el comportamiento anómalo observado en

raíces sugiere que puede existir heterogeneidad microespacial no capturada por promedios cantonales.

Para Cd y Hg, la totalidad de las muestras se ubicó por debajo del límite de detección; esto implica que, respecto a los valores guía (0,5 ppm para Cd y 0,1 ppm para Hg), el sistema no muestra evidencia de carga relevante por estos elementos en la matriz suelo. Sin embargo, metodológicamente, la “no detección” debe interpretarse como “menor que el umbral analítico”, lo cual define un rango posible de concentración (no necesariamente cero).

El Plomo (Pb) mostró cuantificaciones únicamente en Alausí–Chunchi (media 6,60 ppm), lo cual equivale aproximadamente a 26% del valor guía (25 ppm). Aunque este porcentaje se mantiene dentro de rangos aceptables, su distribución espacial (detección focalizada) sugiere analizar Pb como posible marcador de hotspots o de aportes no homogéneos (deposición diferencial o fuentes locales).

Finalmente, el Selenio (Se) presentó valores cuantificables en Alausí–Chunchi (0,53 ppm) y Riobamba (0,44 ppm), que representan cerca de 53% y 44% del valor guía (1 ppm), mientras que en Guamote predominó el comportamiento bajo el límite de detección. Este resultado es relevante porque, aunque Se no es típicamente el metal “más discutido” en suelos, su cercanía relativa al umbral (en porcentaje) sugiere que podría actuar como indicador sensible a deposición volcánica y/o condiciones edáficas que favorezcan su persistencia.

#### **4.6.2 Discusión de límites: total vs biodisponible**

La comparación con valores guía debe interpretarse con una precisión conceptual clave: las concentraciones reportadas en este estudio corresponden principalmente a concentración total (o concentración determinada por el método de digestión/extracción empleado), mientras que el riesgo ambiental y sanitario se define con mayor fidelidad por la fracción biodisponible, es decir, aquella porción

que puede movilizarse a la solución del suelo, ser absorbida por raíces o migrar hacia agua.

En sistemas volcánicos andinos, esta diferencia es especialmente importante porque los suelos derivados de ceniza suelen presentar alta capacidad de adsorción asociada a óxidos de Fe/Al, minerales amorfos y complejación con materia orgánica. En la práctica, esto significa que un suelo puede exhibir niveles “moderados” de un metal en el análisis total, pero mantener una fracción disponible baja si las condiciones edáficas favorecen inmovilización. En el presente estudio, esta lógica es coherente con (i) pH predominantemente neutro a alcalino en varios puntos, (ii) contenidos moderados de MO y (iii) amplitudes de CIC que sugieren capacidad de retención iónica; todo ello tiende a reducir movilidad inmediata para varios elementos.

No obstante, la discusión debe subrayar que esta “estabilidad” no es permanente: la biodisponibilidad puede aumentar por cambios relativamente pequeños en el sistema. Entre los mecanismos más relevantes se incluyen: (a) acidificación asociada a fertilización amoniacal o procesos de nitrificación, (b) competencia iónica/aniónica, particularmente fosfatos compitiendo con arseniatos y modificando la desorción, y (c) cambios en condiciones redox que alteren la estabilidad de óxidos de Fe/Mn y, con ello, la liberación de elementos asociados.

Por tanto, una lectura científicamente sólida requiere distinguir dos conclusiones: (1) el contenido total observado no evidencia contaminación aguda ni excedencias generalizadas, pero (2) el riesgo potencial depende de escenarios que modifiquen la fracción disponible. Como proyección metodológica, se recomienda que futuros monitoreos incorporen aproximaciones a biodisponibilidad (p. ej., extracciones selectivas, fraccionamiento geoquímico o indicadores de solución del suelo) para convertir la evaluación de “estado” en una evaluación más fina de “proceso”.



#### 4.6.3 Hotspots geoquímicos: interpretación territorial

Un rasgo característico de los sistemas volcánico-agrícolas es la heterogeneidad espacial, donde pueden coexistir áreas de baja concentración promedio con microzonas de enriquecimiento (“hotspots”) asociadas a deposición diferencial de ceniza, topografía, escorrentía, acumulación en depresiones, o incluso manejo agrícola localizado. En este contexto, el análisis por cantón es útil para describir patrones regionales, pero la interpretación de riesgo requiere reconocer que la exposición real puede estar determinada por puntos críticos.

En este estudio, existen señales claras para discutir hotspots desde dos ejes. Primero, el Pb cuantificable únicamente en Alausí–Chunchi sugiere una distribución no homogénea. Este comportamiento puede explicarse por deposición volcánica diferencial, pero también por posibles aportes locales (p. ej., cercanía a vías, actividades de combustión, manejo de insumos), por lo que el texto debe proponer hipótesis y justificar por qué el patrón no aparece en los otros cantones. Segundo, el hallazgo de arsénico elevado en raíces en sitios puntuales sin un aumento proporcional en el suelo promedio también es compatible con una lógica de hotspots: microambientes con mayor carga particulada en la rizosfera o contaminación por contacto del tejido radicular con partículas finas ricas en As.

Desde una perspectiva de diseño de monitoreo, la existencia de hotspots implica que no basta con aumentar el número total de muestras, sino que conviene aplicar estrategias de muestreo que capturen microvariabilidad: (i) muestreo pareado suelo–raíz en el mismo punto y profundidad, (ii) réplicas cercanas (p. ej., radios cortos alrededor del cultivo) y (iii) priorización de zonas propensas a acumulación (bordes de parcela, concavidades, áreas con mayor depósito visible de ceniza). De este modo, la discusión se fortalece al pasar de una lectura “promedio” a una lectura territorialmente realista, donde el riesgo se entiende como un fenómeno parcheado (mosaico geoquímico) y no como condición uniforme.

En síntesis, los hotspots no contradicen el hallazgo general de bajas concentraciones promedio; al contrario, explican cómo un sistema puede ser globalmente compatible con agricultura y, simultáneamente, presentar puntos críticos que requieren atención preventiva y verificación específica.

#### **4.7 Aniones y química iónica: vínculos con ceniza, fertilización y movilidad metálica**

Los aniones aportan evidencia clave para comprender procesos de movilidad y manejo agrícola. En Guamate, los nitratos mostraron concentraciones promedio marcadamente superiores, lo que sugiere aportes nitrogenados (fertilización química u orgánica), mineralización acelerada o condiciones que favorecen la acumulación de  $\text{NO}_3^-$  en solución (Assa et al., 2023). Este patrón tiene relevancia porque los nitratos son altamente móviles y pueden indicar mayor riesgo de lixiviación hacia aguas subterráneas, además de reflejar prácticas agrícolas que, indirectamente, modifican el equilibrio químico del suelo.

En Riobamba, los sulfatos registraron valores elevados y con alta dispersión. Los sulfatos pueden estar asociados tanto a aportes volcánicos como a fertilización (sulfatos de amonio, por ejemplo) y a sales del suelo. Desde una perspectiva geoquímica, un ambiente con altas cargas de  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Cl}^-$  implica mayor fuerza iónica, lo que puede influir en procesos de intercambio (Rasiah et al., 2004), competencia por sitios de adsorción y, en ciertos casos, movilización de elementos dependiendo del pH y del balance catiónico (Saussaye et al., 2014).

Los fosfatos mostraron variabilidad y valores relativamente altos, lo cual puede reflejar manejo agrícola y competencia aniónica. En suelos volcánicos, los fosfatos compiten con arseniatos por sitios de adsorción en óxidos de Fe/Al; por ello, discutir fosfatos sin conectarlos con As pierde una oportunidad interpretativa (Tiberg et al., 2020). Un enfoque crítico debe considerar que altos fosfatos podrían, en determinadas condiciones, favorecer la desorción relativa de As por competencia, incluso si el As total en suelo es bajo. Esto no implica que el

fenómeno esté ocurriendo de forma dominante, pero sí que es un mecanismo plausible a vigilar.

#### **4.7.1 Arsénico elevado en raíces: hipótesis explicativas y control de calidad**

Uno de los hallazgos más relevantes del estudio corresponde a la detección de concentraciones elevadas de arsénico en tejido radicular en puntos específicos, en contraste con niveles bajos registrados en el suelo circundante. Esta discrepancia plantea interrogantes interpretativas que deben abordarse con rigor científico.

Una primera hipótesis plausible es la presencia de heterogeneidad microespacial no capturada por el muestreo compuesto de suelo. La deposición de ceniza volcánica no es necesariamente uniforme; pueden existir microzonas de acumulación donde la concentración puntual difiera significativamente del promedio del horizonte superficial.

Una segunda explicación potencial es la adhesión de partículas finas de suelo o ceniza al sistema radicular durante el muestreo. Si el protocolo de lavado del tejido vegetal no elimina completamente las partículas adheridas, el análisis químico puede reflejar contaminación externa más que absorción fisiológica real.

Una tercera posibilidad se relaciona con diferencias en especiación y afinidad radicular. Las raíces pueden retener arsénico en la rizodermis como mecanismo de defensa, limitando su translocación hacia la parte aérea y el órgano comestible, lo cual concuerda con los bajos niveles detectados en producto.

En consecuencia, este hallazgo no debe interpretarse como evidencia concluyente de riesgo alimentario inmediato, sino como señal de posible acumulación localizada que amerita verificación mediante muestreo pareado suelo-planta de alta resolución, protocolos de lavado estandarizados y análisis repetidos para confirmar consistencia.

La incorporación explícita de estas hipótesis no debilita el estudio; por el contrario, demuestra control crítico de calidad y fortalece la credibilidad científica del trabajo.

#### 4.7.2 Nitratos (Guamote): manejo agrícola y riesgo hídrico

El comportamiento de los nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) en Guamote constituye uno de los indicadores más claros de influencia antrópica dentro del sistema evaluado. Las concentraciones promedio marcadamente superiores respecto a otros cantones sugieren que el control dominante en este caso no es exclusivamente litogénico o volcánico, sino probablemente asociado a prácticas agrícolas locales, tales como fertilización nitrogenada (urea, nitrato de amonio), incorporación de estiércoles o mineralización acelerada de materia orgánica bajo determinadas condiciones edafoclimáticas.

Desde el punto de vista geoquímico, el nitrato es un anión muy móvil que no se adsorbe a la fase sólida del suelo, sobre todo en suelos de textura franco arenosa o arenosa como las que predominan en Guamote. En suelos más permeables y con menor contenido de materia orgánica, el  $\text{NO}_3^-$  se mueve fácilmente en sentido vertical, favoreciendo la lixiviación hacia horizontes más profundos y hacia las aguas subterráneas. En este sentido, el nitrato no debe interpretarse como un nutriente agrícola, sino como un indicador indirecto de riesgo hídrico.

La mezcla de texturas más gruesas, densidades elevadas y menor amortiguación orgánica puede intensificar la movilidad del nitrato en Guamote. Esto significa que, aunque el estudio no analizó directamente la calidad del agua subterránea, la señal edáfica que se detectó amerita que se incorpore el monitoreo de nitratos en cuerpos de agua o pozos próximos, sobre todo en áreas agrícolas intensivas.

Además, el exceso de nitratos puede alterar el balance químico del suelo, ya que participa en procesos de acidificación progresiva, sobre todo cuando va asociado a fertilizantes amoniacales cuya nitrificación libera protones. A medio plazo, una bajada de pH puede movilizar ciertos metales traza, afectando indirectamente a su biodisponibilidad. Por lo cual, el nitrato no debe ser

considerado sólo como variable agronómica, sino como variable geoquímica y potencial vector de impacto ambiental secundario.

En resumen, el patrón que se evidencia en Guamote es una alerta de manejo agrícola que debe ser vigilado preventivamente, no por toxicidad directa del nitrato en el suelo, sino por su alta movilidad, potencial impacto hídrico y capacidad de alterar la química del suelo con el tiempo.

#### **4.7.3 Sulfatos (Riobamba): ceniza/fertilización y especiación**

Los sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) registraron valores elevados y con alta dispersión en Riobamba, lo cual sugiere un sistema iónico complejo influenciado tanto por aportes volcánicos como por prácticas agrícolas. En ambientes volcánicos activos, la ceniza puede contener compuestos sulfurados derivados de gases volcánicos ( $\text{SO}_2$ ) que, tras procesos de oxidación atmosférica, se depositan como sulfatos en superficie. Sin embargo, la agricultura intensiva también constituye una fuente importante de sulfatos, especialmente cuando se utilizan fertilizantes como sulfato de amonio o enmiendas sulfatadas.

Desde la perspectiva geoquímica, los sulfatos desempeñan un papel más amplio que el de simple anión acompañante. Una mayor concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  incrementa la fuerza iónica de la solución del suelo, lo que puede modificar el equilibrio de intercambio catiónico y la competencia por sitios de adsorción. En suelos con alta CIC y presencia de sodio intercambiable como se observó en Riobamba la interacción entre  $\text{Na}^+$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  puede contribuir a procesos de salinidad relativa y afectar la estabilidad estructural del suelo.

En términos de especiación metálica, los sulfatos pueden influir indirectamente en la movilidad de ciertos metales. Por ejemplo, en condiciones ácidas, algunos metales pueden formar complejos solubles con sulfatos, mientras que en condiciones más neutras o alcalinas el efecto puede ser menor. Aunque los valores de pH registrados en Riobamba tienden hacia condiciones alcalinas, el sistema no debe considerarse estático, ya que variaciones temporales

(precipitaciones intensas, fertilización, deposición fresca de ceniza) podrían alterar la dinámica.

Asimismo, es importante considerar que el sulfato puede contribuir a procesos de acidificación si se asocia a nitrificación o a oxidación de compuestos reducidos. En escenarios de deposición volcánica recurrente, una acumulación sostenida de compuestos sulfurados podría modificar gradualmente el pH superficial, con implicaciones directas sobre la movilidad de elementos traza.

En consecuencia, los sulfatos en Riobamba representan una señal geoquímica que debe interpretarse como resultado de interacción entre aporte natural y manejo agrícola, con potencial capacidad de influir en la especiación y movilidad futura de metales, aun cuando actualmente no se observen excedencias normativas.

#### **4.7.4 Fosfatos: competencia con arseniatos**

Los fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) mostraron variabilidad inter-cantonal y valores relativamente elevados en algunos puntos, lo que sugiere influencia significativa de manejo agrícola mediante fertilización fosfatada. En suelos volcánicos, el fósforo presenta una dinámica particular: tiende a adsorberse fuertemente a óxidos de hierro y aluminio, lo que puede limitar su disponibilidad para las plantas y promover aplicaciones reiteradas de fertilizantes. Este comportamiento genera un sistema donde la saturación parcial de sitios de adsorción puede modificar el equilibrio aniónico del suelo.

La relevancia de los fosfatos en este estudio trasciende su rol nutricional, debido a su estrecha relación química con el arseniato ( $\text{AsO}_4^{3-}$ ). Ambos comparten similitud estructural y compiten por los mismos sitios de adsorción en superficies de óxidos de Fe y Al. En consecuencia, incrementos en la concentración de fosfatos pueden desplazar arseniatos previamente adsorbidos, aumentando su fracción en solución y, potencialmente, su biodisponibilidad.

Aunque en los resultados del suelo el arsénico total se mantuvo bajo, la discusión debe incorporar este mecanismo competitivo como proceso plausible en escenarios de alta fertilización fosfatada. Este aspecto adquiere especial relevancia considerando el hallazgo de concentraciones elevadas de arsénico en raíces en puntos específicos. Si bien no se puede afirmar que la competencia fosfato–arseniato sea la causa directa, sí constituye un mecanismo teóricamente consistente que debe ser reconocido en la interpretación integral.

Desde una perspectiva de gestión, este análisis sugiere que el manejo racional del fósforo no solo es relevante para eficiencia agronómica, sino también para mantener el equilibrio geoquímico del sistema y evitar movilización innecesaria de elementos traza. En territorios volcánicos activos, donde el material parental ya puede aportar niveles naturales de ciertos elementos, la interacción entre fertilización y mineralogía adquiere mayor importancia.

En síntesis, los fosfatos deben interpretarse como variable estratégica en el control de biodisponibilidad de arsénico, reforzando la idea central del capítulo: el riesgo no depende únicamente de concentraciones totales, sino de la interacción dinámica entre química del suelo, manejo agrícola y procesos de especiación.

#### **4.8 Transferencia suelo–planta: evidencia de retención radicular y un hallazgo crítico en arsénico**

El análisis de biomasa vegetal mostró un patrón general consistente: mayor acumulación en raíz, seguida por parte aérea y, finalmente, por el órgano comestible (Xing et al., 2020). Este patrón sugiere que, en el estado actual, la planta funciona como un sistema de retención y filtrado biológico, reduciendo la transferencia hacia el producto, lo cual es positivo desde la perspectiva de seguridad alimentaria.

Sin embargo, la discusión debe profundizar en dos elementos: primero, la movilidad del sodio, que mostró valores elevados en raíces y parte aérea. Este comportamiento es coherente con la alta movilidad del Na en el sistema planta–

suelo y puede relacionarse con la carga iónica del suelo y con procesos de absorción osmótica (Goyal et al., 2021). En términos de gestión, altos niveles de Na en tejido vegetal pueden ser un indicador indirecto de condiciones de salinidad local o de aportes por manejo, lo cual merece vigilancia por impactos agronómicos (Maach et al., 2024).

El segundo elemento es crítico: se observaron concentraciones puntuales muy elevadas de arsénico en raíces, mientras que el As en suelo mostró valores bajos. Esta discrepancia debe discutirse con rigor porque puede tener varias explicaciones científicas. Una hipótesis plausible es la presencia de “hotspots” microespaciales no capturados por el muestreo de suelo (heterogeneidad de ceniza/partículas) (Shree Shakya Hada et al., 2022). Otra explicación es la posible contaminación externa por partículas de suelo/ceniza adheridas al tejido radicular durante el muestreo, lo cual elevaría artificialmente el valor en raíz si no se aplicó un protocolo de lavado estandarizado previo al análisis (Liu et al., 2018). También es posible que existan diferencias en correspondencia espacial o temporal entre el punto exacto de suelo y la biomasa, o que el método analítico en matriz vegetal requiera control de interferencias.

En cualquier caso, este hallazgo no debe presentarse como concluyente sin matices; más bien, debe interpretarse como un indicador de riesgo potencial localizado que amerita verificación mediante repetición analítica, control de blancos, estandarización de lavado de tejido y muestreo pareado suelo–planta de alta resolución. Incorporar esta discusión fortalece la credibilidad del libro, porque demuestra capacidad crítica y control de calidad científica.

Respecto a Ni, Hg, Cd, Pb y Se en biomasa, las concentraciones bajas o no cuantificables en órganos evaluados refuerzan la interpretación de que, bajo las condiciones actuales, no existe transferencia significativa hacia el producto (Culqui et al., 2025). No obstante, la discusión debe enfatizar que la bioacumulación puede



ser un proceso gradual, y que escenarios de deposición recurrente o cambios en pH podrían modificar la biodisponibilidad en el tiempo.

#### **4.8.1 Factores de bioconcentración y translocación**

La transferencia de elementos desde el suelo hacia la biomasa vegetal puede analizarse de manera más robusta cuando se interpreta bajo el enfoque de bioconcentración y translocación. En términos conceptuales, la bioconcentración describe la capacidad de la planta para acumular un elemento en la raíz respecto a su concentración en el suelo, mientras que la translocación se refiere al movimiento interno del elemento desde la raíz hacia la parte aérea y, finalmente, hacia el órgano comestible. Aunque en este estudio no se calcularon de forma explícita los índices clásicos (p. ej., BCF y TF) para todas las muestras, los patrones empíricos obtenidos permiten discutir la eficiencia relativa de estos procesos.

En el caso de Na, las concentraciones registradas fueron marcadamente elevadas en raíces y parte aérea, con valores que alcanzaron máximos altos en comparación con otros elementos evaluados. Este patrón sugiere una alta capacidad de absorción y movilidad interna, consistente con el comportamiento iónico del sodio en condiciones de mayor carga salina o disponibilidad en solución. A diferencia de metales pesados típicamente regulados por mecanismos de exclusión o retención, el sodio tiende a mostrar mayor movilidad en el continuum suelo–planta, lo que explica que se evidencie tanto en tejido radicales como en tejidos aéreos.

Por otro lado, los metales de mayor relevancia toxicológica en el estudio (Cd, Pb, Hg y Se) se mantuvieron en concentraciones bajas o bajo límites de cuantificación en la biomasa. Esta situación es relevante porque, aun cuando el suelo pueda actuar como compartimento receptor de aportes geogénicos o volcánicos, la transferencia efectiva hacia la planta y particularmente hacia el producto constituye el indicador más directo para evaluar riesgo alimentario. La baja presencia de estos elementos en tejidos vegetales puede interpretarse como

evidencia de una exposición actual limitada, coherente con la ausencia de concentraciones elevadas en suelo y con condiciones edáficas que favorecen retención (pH neutro a alcalino en varios puntos, presencia de MO y capacidad de intercambio catiónico moderada a alta).

En cuanto a Cr y Ni, los resultados sugieren una movilización baja a intermedia. El cromo se detectó en raíces y parte aérea en rangos moderados, mientras que el níquel se mantuvo predominantemente por debajo del límite de cuantificación, con detecciones puntuales aisladas en parte aérea. Este comportamiento puede responder tanto a una baja biodisponibilidad en el suelo como a mecanismos fisiológicos de exclusión o regulación a nivel de absorción radicular. En términos interpretativos, esto respalda que el sistema planta–suelo no está facilitando transferencia relevante de Ni hacia órganos comestibles bajo las condiciones evaluadas.

En síntesis, la lectura conjunta de resultados permite señalar que la transferencia suelo–planta responde a un patrón diferenciado: alta movilidad para Na, movilidad intermedia para Cr y baja transferencia para Ni, Cd, Pb, Hg y Se, mientras que As requiere un análisis particular por el comportamiento anómalo observado en raíces (tratado en el apartado 4.8.3). Este enfoque fortalece la discusión porque permite pasar de una lista descriptiva de concentraciones a una interpretación funcional del sistema planta–suelo como barrera o vía de exposición.

#### **4.8.2 Barrera radicular y riesgo en producto**

Los resultados de biomasa evidencian un patrón general de mayor concentración en raíces, seguido por parte aérea y, finalmente, niveles más bajos en el producto. Este comportamiento es consistente con el concepto de “barrera radicular”, entendido como el conjunto de mecanismos físicos y fisiológicos que limitan el paso de elementos potencialmente tóxicos hacia tejidos superiores. En términos ecológicos, la raíz opera como el primer filtro de interacción con la

solución del suelo, donde procesos de adsorción en pared celular, complejación en rizosfera y secuestro en vacuolas contribuyen a restringir el transporte interno.

En este estudio, la baja concentración de metales de alta peligrosidad (Cd, Pb, Hg y Se) en el producto es un resultado particularmente relevante desde el punto de vista toxicológico y de seguridad alimentaria. El riesgo para la salud humana se relaciona principalmente con la exposición por ingesta; por ello, aun en sistemas donde exista detección de elementos en suelo o en raíz, el análisis del producto permite evaluar con mayor precisión la probabilidad de exposición directa. En la mayoría de los casos evaluados, el órgano comestible presentó valores bajos o no cuantificables, lo cual sugiere que, bajo las condiciones actuales, la cadena alimentaria no está recibiendo una carga relevante de metales pesados desde el sistema suelo-planta.

No obstante, la barrera radicular no debe interpretarse como un mecanismo infalible o permanente. Su eficiencia depende de factores edáficos y ambientales: el pH puede modificar la especiación y la solubilidad de metales; la salinidad y la fuerza iónica pueden alterar la competencia por sitios de intercambio; y el contenido de materia orgánica puede promover complejación o, en ciertos casos, transporte asociado a ligandos orgánicos. En escenarios de deposición recurrente de ceniza volcánica o intensificación agrícola, es posible que cambie la biodisponibilidad de ciertos elementos traza aun si los valores totales en suelo permanecen dentro de rangos considerados aceptables.

Desde una perspectiva de gestión ambiental, el patrón observado sugiere que el sistema estudiado presenta riesgo alimentario bajo en el momento de evaluación, pero con necesidad de vigilancia preventiva en escenarios de variabilidad temporal. Esto es especialmente relevante en territorios volcánicos activos, donde la deposición de ceniza puede ocurrir de manera intermitente y modificar gradualmente el equilibrio geoquímico. Por ello, la interpretación de los resultados debe priorizar un enfoque preventivo: monitoreo periódico del producto,

especialmente tras episodios de deposición significativa, y seguimiento de variables reguladoras del suelo (pH, MO, aniones y salinidad) que puedan aumentar la movilidad metálica.

#### **4.8.3 El caso crítico del As en raíces**

El comportamiento del arsénico en biomasa constituye el hallazgo más crítico del análisis suelo-planta. Se registraron concentraciones puntualmente elevadas de As en raíces, mientras que el arsénico en suelo se mantuvo en rangos bajos. Esta discrepancia no puede interpretarse de forma lineal y requiere un abordaje crítico, ya que puede responder a mecanismos distintos que implican riesgos y niveles de certeza diferentes.

Una primera hipótesis es la heterogeneidad microespacial de la deposición volcánica. La ceniza no se distribuye de manera uniforme y puede generar microzonas con mayor concentración de partículas finas ricas en elementos traza. Si el muestreo de suelo se realizó de manera compuesta o en un punto cercano, pero no estrictamente coincidente con el sistema radicular muestreado, es posible que el análisis de suelo no capture con precisión el “microambiente” químico real de la rizosfera. En este contexto, valores puntuales altos en raíces podrían estar reflejando exposición localizada en zonas específicas del terreno.

Una segunda explicación, igualmente plausible, es la contaminación externa del tejido radicular por adherencia de partículas de suelo o ceniza. La raíz, por su morfología y contacto directo con el suelo, puede retener partículas finas fuertemente adsorbidas. Si el lavado del material vegetal previo al análisis no fue suficientemente riguroso o estandarizado, el arsénico cuantificado puede corresponder en parte a material particulado adherido más que a arsénico absorbido y acumulado fisiológicamente. Esta posibilidad no invalida el resultado, pero cambia su interpretación: pasaríamos de un fenómeno de bioacumulación a un fenómeno de contaminación por contacto.

Una tercera hipótesis considera mecanismos de retención selectiva en raíz con baja translocación. Diversas especies vegetales tienden a restringir el arsénico en el sistema radicular como estrategia de defensa, limitando su transporte hacia la parte aérea y el producto. Esta explicación es consistente con el patrón observado de menor concentración en órganos superiores y, particularmente, con niveles bajos en el producto. En este caso, el hallazgo en raíces señalaría una interacción intensa a nivel de rizosfera, pero con un riesgo alimentario directo aún limitado.

En consecuencia, este resultado debe presentarse como un indicador de alerta científica que amerita verificación y refinamiento metodológico. Para fortalecer la certeza interpretativa y diferenciar entre absorción real y contaminación externa, se recomienda complementar el análisis con muestreo estrictamente pareado suelo-raíz (mismo punto y profundidad), aplicación de protocolos de lavado estandarizados, control de blancos y duplicados en matriz vegetal, y de ser posible determinación de fracciones biodisponibles de As en suelo (extracciones selectivas) o análisis en la rizosfera.

En términos de riesgo, el hallazgo no constituye evidencia concluyente de contaminación alimentaria inmediata, dado que el producto presentó valores bajos; sin embargo, sí sugiere la presencia de condiciones o microzonas donde el arsénico interactúa intensamente con el sistema radicular. Esto justifica un enfoque preventivo centrado en el monitoreo de As y en la identificación de factores que puedan incrementar su biodisponibilidad, como cambios en pH, competencia con fosfatos y variaciones en condiciones redox del suelo.

#### **4.9 Evaluación integrada del impacto: Matriz de Leopold, riesgo actual y riesgo potencial**

La Matriz de Leopold permitió jerarquizar interacciones y traducir resultados analíticos a un lenguaje de impacto ambiental. La identificación de impactos mayores asociados a la acumulación de metales en el horizonte superficial y a la potencial transferencia hacia cultivos es coherente con la lógica

del estudio: el suelo actúa como compartimento receptor primario, y el riesgo socialmente más relevante se expresa cuando la cadena alimentaria se ve afectada.

No obstante, la discusión debe diferenciar entre “impacto potencial” y “impacto observado”. En el presente estudio, la evidencia de metales altamente tóxicos (Cd, Hg) por debajo del límite de detección y la baja transferencia a producto sugieren que el impacto observado es bajo (Trindade Filho et al., 2025). Sin embargo, la propia matriz señala puntos de vulnerabilidad: lixiviación y acumulación superficial como rutas de riesgo en escenarios de deposición continua de ceniza (Vallejo-Azar et al., 2024). Esta lectura es consistente con la necesidad de enfoques longitudinales en sistemas volcánicos, donde los cambios acumulativos pueden manifestarse en escalas de años o décadas.

Por ello, el riesgo integrado puede clasificarse como bajo a moderado en el estado actual, condicionado por dos factores: la persistencia del volcanismo activo y la variabilidad territorial de condiciones edáficas y de manejo. La discusión debe cerrar con esta idea: la ausencia de excedencias normativas hoy no elimina el riesgo potencial mañana, porque los metales son persistentes y su comportamiento depende de condiciones cambiantes.

#### **4.10 Contaminación versus enriquecimiento natural: implicaciones epistemológicas y necesidad de líneas base**

Un aporte conceptual central del estudio es la distinción entre contaminación antropogénica y aporte geogénico. En áreas volcánicas activas, la presencia de elementos traza puede representar una “firma natural” del territorio más que un proceso de contaminación en sentido clásico. Sin embargo, cuando las concentraciones (o su biodisponibilidad) alteran la funcionalidad del suelo o aumentan la exposición humana, el fenómeno adquiere relevancia como riesgo ambiental, independientemente del origen natural (D’Souza et al., 2023).

En este marco, el estudio contribuye a construir líneas base territoriales para Chimborazo, útiles para la gestión ambiental y para diferenciar cambios futuros

asociados a deposición volcánica o a prácticas agrícolas. Esta discusión es clave porque fortalece la utilidad del libro: no solo reporta datos, sino que establece referencias para monitoreo.

#### **4.11 Limitaciones, control de calidad e incertidumbre: transparencia científica**

Para fortalecer la validez científica del libro, la discusión debe explicitar limitaciones inherentes al diseño. Primero, el muestreo por cantón, aunque valioso, puede no capturar microheterogeneidad asociada a deposición de ceniza, especialmente cuando existen “hotspots”. Segundo, la interpretación de valores bajo límites de detección debe reconocer que define rangos posibles, no ausencia absoluta. Tercero, el análisis de metales en suelo reporta concentraciones totales, pero no distingue fracciones biodisponibles; la especiación o fraccionamiento geoquímico permitiría una evaluación más precisa del riesgo. Cuarto, algunos patrones (como C muy bajo vs N alto) deben revisarse en términos de consistencia analítica, unidades y método para asegurar comparabilidad.

Lejos de debilitar el estudio, esta transparencia lo hace más sólido y defendible, y orienta líneas de investigación futuras.

#### **4.12 Implicaciones para gestión territorial y recomendaciones basadas en evidencia**

A partir de los resultados, la gestión sostenible debería priorizar un enfoque preventivo y territorialmente diferenciado. Se recomienda implementar monitoreo periódico de Ni, As y Se en suelos agrícolas, con mayor atención a cantones o zonas donde se observe mayor variabilidad y dispersión. Dado el perfil iónico observado, conviene integrar el seguimiento de Na, sulfatos y cloruros, especialmente en Riobamba, por su potencial relación con salinidad/sodicidad y sus implicaciones agronómicas y geoquímicas (Javed et al., 2022).

En biomasa, se recomienda continuar el monitoreo de metales en órganos comestibles, especialmente después de eventos eruptivos con deposición visible de

ceniza (Carrera-Beltrán et al., 2025). En el caso del arsénico en raíces, se sugiere un protocolo de verificación que incluya lavado estandarizado, muestreo pareado suelo-planta y control de matriz analítica, para discriminar entre absorción real y contaminación externa.

Finalmente, prácticas de manejo como mantener y aumentar materia orgánica, evitar acidificación progresiva y ajustar fertilización (en especial N y S) pueden contribuir a preservar la capacidad amortiguadora del suelo y reducir la probabilidad de movilización de elementos traza a mediano plazo.

#### **4.13 Síntesis interpretativa**

En conjunto, los resultados revelan que los suelos agrícolas bajo influencia del volcán Sangay mantienen actualmente condiciones compatibles con la actividad productiva y no presentan superación generalizada de límites normativos. Sin embargo, la dinámica geoquímica observada confirma que estos sistemas se encuentran en equilibrio condicionado, susceptible a modificaciones bajo cambios en el pH, régimen hídrico o intensidad eruptiva.

El estudio aporta evidencia científica que permite diferenciar entre estado actual y riesgo potencial, contribuyendo al entendimiento de los sistemas volcánico-agrícolas andinos desde una perspectiva integrada y preventiva.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adimalla, N. (2020). Heavy metals contamination in urban surface soils of Medak province, India, and its risk assessment and spatial distribution. *Environmental Geochemistry and Health*, 42(1), 59–75. <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00270-1>
- Albert, L. (2004). Contaminación ambiental. Origen, clases, fuentes y efectos. *Revista de La Facultad de Salud Pública y Nutrición*, 14, 228–231.
- AOAC. (2019). *Official methods of analysis (21st ed.)*.
- Aragay, G., Pons, J., & Merkoçi, A. (2011). tendencias recientes en herramientas y estrategias basadas en macro, micro y nanomateriales para la detección de metales pesados. *Chemical Reviews*, 111, 3433–3458.
- Assa, B. G., Bhowmick, A., & Cholo, B. E. (2023). Modeling Nitrogen Balance for Pre-Assessment of Surface and Groundwater Nitrate (NO<sub>3</sub>–N) Contamination from N–Fertilizer Application Loss: a Case of the Bilate Downstream Watershed Cropland. *Water, Air, & Soil Pollution*, 234(2), 105. <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06114-0>
- Ayris, P. M., & Delmelle, P. (2012). The immediate environmental effects of tephra emission. *Bulletin of Volcanology*, 74(9), 1905–1936. <https://doi.org/10.1007/s00445-012-0654-5>
- Beltrán-Dávalos, A. A., Salazar, C., Kurbatova, A. I., Echeverría, M., Merino, A., & Otero, X. L. (2025). Sediment Chemistry and Ecological Risk Assessment in Andean Lakes of Central Ecuador: Influence of Trophic Status on Accumulation Patterns. *Sustainability*, 17(8), 3397. <https://doi.org/10.3390/su17083397>
- Bemelmans, N., Dejjardin, R., Arbalestrie, B., & Agnan, Y. (2024). Glyphosate application may influence the transfer of trace elements from soils to both soil

- solutions and plants. *Chemosphere*, 367, 143603.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143603>
- Cao, C., Zhang, Q., Ma, Z.-B., Wang, X.-M., Chen, H., & Wang, J.-J. (2018). Fractionation and mobility risks of heavy metals and metalloids in wastewater-irrigated agricultural soils from greenhouses and fields in Gansu, China. *Geoderma*, 328, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.05.001>
- Carrera-Beltrán, L., Gavilanes-Terán, I., Valverde-Orozco, V. H., Ramos-Romero, S., Paredes, C., Carbonell-Barrachina, Á. A., & Signes-Pastor, A. J. (2025). Assessment of Heavy Metal Transfer from Soil to Forage and Milk in the Tungurahua Volcano Area, Ecuador. *Agriculture*, 15(19), 2072. <https://doi.org/10.3390/agriculture15192072>
- Collin, B., & Doelsch, E. (2010). Impact of high natural soilborne heavy metal concentrations on the mobility and phytoavailability of these elements for sugarcane. *Geoderma*, 159(3–4), 452–458. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.09.013>
- Culqui, L., Haro, N., Rascón, J., Tafur Chuquizuta, L., Vigo, C. N., Leiva-Tafur, D., Juarez-Contreras, L., & Oliva-Cruz, M. (2025). Analysis of heavy metals in silvopastoral systems: a strategy for livestock sustainability in the district of Molinopampa, Amazonas, Peru. *Soil Security*, 20, 100197. <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2025.100197>
- Darack, E. (2008). weatherscapes: Ecuador's Tungurahua Volcano: The 'Throat of Fire.' *Weatherwise*, 61(4), 10–11. <https://doi.org/10.3200/WEWI.613.4.10-11>
- Das, R., Bin Mohamed Mohtar, A. T., Rakshit, D., Shome, D., & Wang, X. (2018). Sources of atmospheric lead (Pb) in and around an Indian megacity. *Atmospheric Environment*, 193, 57–65. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.08.062>

- D'Souza, R., Favas, P. J. C., Varun, M., & Paul, M. S. (2023). Dynamics of Trace Element Bioavailability in Soil. In *Medical Geology* (pp. 203–216). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119867371.ch13>
- Dyson, E. N., Hagmann, D. F., Idrovo, C., Krumins, J. A., & Goodey, N. M. (2024). Brownfield Topsoil Vertical Heterogeneity: Implications for Germination and Soil Microbial Functioning. *ACS Omega*, 9(40), 41544–41554. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c05265>
- El Youssfi, M., Sifou, A., Ben Aakame, R., Mahnine, N., Arsalane, S., Halim, M., Laghzizil, A., & Zinedine, A. (2023). Trace elements in Foodstuffs from the Mediterranean Basin—Occurrence, Risk Assessment, Regulations, and Prevention strategies: A review. *Biological Trace Element Research*, 201(5), 2597–2626. <https://doi.org/10.1007/s12011-022-03334-z>
- Enemo, D. C., Onah, M. C., Obalum, S. E., Njoku, O. M., & Igwe, C. A. (2025). Organic matter influence on particle density of low-activity-clay tropical soils and the implications for their porosity assessment. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 22(13), 12507–12516. <https://doi.org/10.1007/s13762-025-06383-8>
- Fonfría, R. S., Sans, R., & Pablo Ribas, J. (1989). *Ingeniería ambiental: contaminación y tratamientos*. 28.
- García-Carmona, M., Romero-Freire, A., Sierra Aragón, M., & Martín Peinado, F. J. (2019). Effectiveness of ecotoxicological tests in relation to physicochemical properties of Zn and Cu polluted Mediterranean soils. *Geoderma*, 338, 259–268. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.12.016>
- Gavilanes Terán Irene, Ramos Romero Steven, & Idrovo Novillo Julio. (2026). *Análisis de metales pesados por espectroscopía de absorción atómica (EAA)*

*para evaluar la contaminación ambiental ocasionada por la ceniza volcánica en cantones de la provincia de Chimborazo.*

- Goyal, G., Yadav, A., & Dubey, G. (2021). Effect of Salt Stress on Soil Chemistry and Plant-Atmosphere Continuum (SPAC). In *Physiology of Salt Stress in Plants* (pp. 106–128). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119700517.ch7>
- Horwell, C. J., & Baxter, P. J. (2006). The respiratory health hazards of volcanic ash: a review for volcanic risk mitigation. *Bulletin of Volcanology*, 69(1), 1–24. <https://doi.org/10.1007/s00445-006-0052-y>
- Inouhe, M., Huang, H., Chaudhary, S. K., & Gupta, D. K. (2012). Heavy Metal Bindings and Their Interactions with Thiol Peptides and Other Biological Ligands in Plant Cells. In *Metal Toxicity in Plants: Perception, Signaling and Remediation* (pp. 1–21). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-22081-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-22081-4_1)
- Jarup, L. (2003). *Hazards of heavy metal contamination Br Med Bull* 68. 167–182.
- Javed, S. A., Shahzad, S. M., Ashraf, M., Kausar, R., Arif, M. S., Albasher, G., Rizwana, H., & Shakoor, A. (2022). Interactive effect of different salinity sources and their formulations on plant growth, ionic homeostasis and seed quality of maize. *Chemosphere*, 291, 132678. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132678>
- Jenkins, S., Wilson, T., Magill, C., Miller, V., Stewart, C., Blong, R., & Costa, A. (2015). Volcanic ash fall hazard and risk. *Global Volcanic Hazards and Risk*, 173–222.
- Jiang, Z.-D., Wang, Q.-B., Libohova, Z., Adhikari, K., Brye, K. R., Sun, Z.-X., Sun, F.-J., Jiang, Y.-Y., & Owens, P. R. (2021). Fe-Mn concentrations in upland loess soils in mid-continental north America: A step towards dynamic soil survey. *CATENA*, 202, 105273. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105273>

- Jolly, Y. N., Rakib, Md. R. J., Sakib, M. S., Shahadat, M. A., Rahman, A., Akter, S., Kabir, J., Rahman, M. S., Begum, B. A., Rahman, R., Sulieman, A., Tamam, N., Khandaker, M. U., & Idris, A. M. (2022). Impact of Industrially Affected Soil on Humans: A Soil-Human and Soil-Plant-Human Exposure Assessment. *Toxics*, 10(7), 347. <https://doi.org/10.3390/toxics10070347>
- Joshi, N., Kaur, R., Fahad, S., & Nawaz, T. (2026). Effects of soil texture and structure on nutrient chemistry and plant uptake. In *Sustainable Soil Chemistry and Plant Nutrition* (pp. 251–270). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-40584-6.00016-4>
- Labourdette, V. B. (2023). *Contaminación Ambiental*.
- Lebron, I., Feeney, C. J., Reinsch, S., Shokri, N., Afshar, M. H., Lofts, S., Griffiths, R., Fidler, D., Jones, B., Panagos, P., Sawicka, K., Keith, A. M., Seaton, F., & Robinson, D. A. (2025). Patterns and thresholds for soil pH across Europe in relation to soil health and degradation. *CATENA*, 260, 109454. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.109454>
- Levy, G. J., & Bar-Tal, A. (2023). Alkali metals in soils. In *Encyclopedia of Soils in the Environment* (pp. 116–125). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822974-3.00175-0>
- Liu, J., Zhang, L., Fu, Q., Ren, G., Liu, L., Yu, P., & Tan, S. (2018). Spatial Variability of Soil Particle-Size Distribution Heterogeneity in Farmland. *Transactions of the ASABE*, 61(2), 591–601. <https://doi.org/10.13031/trans.12541>
- M., Fa. B., S., B. T., O., A. S., & S., F. A. (2025). Influence of iron and manganese forms on pedogenesis in residual soils of the Savanna ecosystem . *Research on Crops*, Volume 26(Issue 1 (march) 2025). <https://doi.org/10.31830/2348-7542.2025.ROC-1141>

- Maach, M., Akodad, M., Pilar Rodríguez-Rosal, M., Venema, K., Skalli, A., Ait Hmeid, H., El haddaji, H., Gueddari, H., & Baghour, M. (2024). Strategies of NHX antiporters to deal with salt stress. *Plant Science Today*. <https://doi.org/10.14719/pst.2442>
- Mahecha-Pulido, J. D., Trujillo-González, J. M., & Torres-Mora, M. A. (2015). *Heavy metal content in agricultural soil from the Ariari region in the Meta department*. 19, 118–122.
- Maldonado, J. M. (2009). (2009). Ciudades y contaminación ambiental. *Revista de Ingeniería*, 66–71.
- Nederlof, M. M., & Van Riemsdijk, W. H. (2023). Effect of Natural Organic Matter and pH on the Bioavailability of Metal Ions in Soils. In *Environmental Impacts of Soil Component Interactions* (pp. 75–86). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780138757045-8>
- Okur, B., & Örcen, N. (2020). Soil salinization and climate change. In *Climate Change and Soil Interactions* (pp. 331–350). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818032-7.00012-6>
- Pardo, N., Espinosa, M. L., González-Arango, C., Cabrera, M. A., Salazar, S., Archila, S., Palacios, N., Prieto, D., Camacho, R., & Parra-Agudelo, L. (2021). Worlding resilience in the Doña Juana Volcano-Páramo, Northern Andes (Colombia): A transdisciplinary view. *Natural Hazards*, 107(2), 1845–1880. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04662-4>
- Pierson, T. C., Wood, N. J., & Driedger, C. L. (2014). Reducing risk from lahar hazards: concepts, case studies, and roles for scientists. *Journal of Applied Volcanology*, 3(1), 16. <https://doi.org/10.1186/s13617-014-0016-4>
- Puttaswamy, N., & Liber, K. (2012). Influence of inorganic anions on metals release from oil sands coke and on toxicity of nickel and vanadium to

Ceriodaphnia dubia. *Chemosphere*, 86(5), 521–529.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.10.018>

Rasiah, V., Armour, J. D., Menzies, N. W., Heiner, D. H., & Donn, M. J. (2004). Impact of pre-existing sulphate on retention of imported chloride and nitrate in variable charge soil profiles. *Geoderma*, 123(3–4), 205–218.  
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.02.001>

Rechberger, M. V., Zehetner, F., & Gerzabek, M. H. (2021). Phosphate sorption-desorption properties in volcanic topsoils along a chronosequence and a climatic gradient on the Galápagos Islands. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 184(4), 479–491. <https://doi.org/10.1002/jpln.202000488>

Ruyter-Hooley, M., Larsson, A.-C., Johnson, B. B., Antzutkin, O. N., & Angove, M. J. (2016). The effect of inositol hexaphosphate on cadmium sorption to gibbsite. *Journal of Colloid and Interface Science*, 474, 159–170.  
<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2016.04.028>

Salazar Reyes, M. G. (2011). *Determinación de metales pesados, cadmio, níquel y plomo, por espectrofotometría de absorción atómica, en suelos agrícolas del sector de Penipe, contaminados con cenizas del volcán Tungurahua.*

Saussaye, L., Boutouil, M., Baraud, F., & Leleyter, L. (2014). Influence of anions on the geotechnical properties of soils treated with hydraulic binders: Individual and coupling effects. *Construction and Building Materials*, 65, 303–309. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.109>

Sebola Tshisikhawe, C., & Ngole-Jeme, V. M. (2024). Temperature induced changes on heavy metal geochemical partitioning and mobility in contaminated and uncontaminated soils. *Environmental Pollutants and Bioavailability*, 36(1). <https://doi.org/10.1080/26395940.2024.2317747>

- Shahid, M., Khalid, S., AL-Othman, Z., Al-Kahtani, A. A., Dumat, C., & Murtaza, B. (2025). A Comparative Study on Chemical Speciation of Trace Metals as a Function of Solution pH: A Multivariate Analysis and Simulation Approach. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 56(7), 1132–1144. <https://doi.org/10.1080/00103624.2025.2452160>
- Shree Shakya Hada, M., Tuladhar, R., Shrestha, A., Manandhar, S., & Singh, A. (2022). Fungal association in hotspot of rhizosphere. In *Microbial Diversity in Hotspots* (pp. 97–116). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90148-2.00016-X>
- Sidhu, G. P. S., Singh, H. P., Batish, D. R., & Kohli, R. K. (2017). Appraising the role of environment friendly chelants in alleviating lead by *Coronopus didymus* from Pb-contaminated soils. *Chemosphere*, 182, 129–136. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.05.026>
- Takahashi, T. (2020). The diversity of volcanic soils: focusing on the function of aluminum–humus complexes. *Soil Science and Plant Nutrition*, 66(5), 666–672. <https://doi.org/10.1080/00380768.2020.1769453>
- Tang, L., Yang, J., Cai, Y., Hu, S., Gong, Q., Zhang, M., Li, Y., & Su, L. (2025). Soil Geochemical Controls on Heavy Metal(loid) Accumulation in Tuber Crops from Basalt-Derived Soils and Associated Dietary Intake Health Risks on Hainan Island, China. *Toxics*, 14(1), 48. <https://doi.org/10.3390/toxics14010048>
- Tanneberg, H., & Jahn, R. (n.d.). Heavy metal sorption by andic and non-andic horizons from volcanic parent materials. In *Soils of Volcanic Regions in Europe* (pp. 423–435). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-48711-1\\_31](https://doi.org/10.1007/978-3-540-48711-1_31)



- Templeton, D. M., Ariese, F., Cornelis, R., Danielsson, L.-G., Muntau, H., van Leeuwen, H. P., & Lobinski, R. (2000). Guidelines for terms related to chemical speciation and fractionation of elements. Definitions, structural aspects, and methodological approaches (IUPAC Recommendations 2000). *Pure and Applied Chemistry*, 72(8), 1453–1470. <https://doi.org/10.1351/pac200072081453>
- Tiberg, C., Sjöstedt, C., Eriksson, A. K., Klysubun, W., & Gustafsson, J. P. (2020). Phosphate competition with arsenate on poorly crystalline iron and aluminum (hydr)oxide mixtures. *Chemosphere*, 255, 126937. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126937>
- Trindade Filho, W. J., Borges, T. de M. D., Silva, B. C. da, & Correia, V. M. S. (2025). The use of Life Cycle Assessment and the Leopold Matrix to analyze environmental aspects and impacts in a handmade soap production industry. *Gestão & Produção*, 32. <https://doi.org/10.1590/1806-9649-2025v32e3624>
- Vallejo-Azar, N. K., Escudero, L. A., Fernandez-Turiel, J.-L., & Gil, R. A. (2024). Experimental design and multiple response optimization of batch leaching tests of volcanic ashes. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(50), 59931–59946. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-35191-9>
- Violante, A., Cozzolino, V., Perelomov, L., Caporale, A. G., & Pigna, M. (2010). Mobility and bioavailability of heavy metals and metalloids in soil environments. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 10(3). <https://doi.org/10.4067/S0718-95162010000100005>
- Wang, H., Chen, Y., Ji, J., Li, X., William Hedding, D., & Chen, J. (2023). Chemical weathering intensity controls the accumulation of nickel in rice (*Oryza sativa* L.) cultivated in basalt-derived paddy fields. *Geoderma*, 434, 116494. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116494>

- Wendemeneh, D., Ayana, M., Haileslassie, A., & Lohani, T. K. (2024). Spatiotemporal variation in soil salinity under irrigated fields at Bochessa catchment in Central Ethiopia. *Irrigation and Drainage*, 73(2), 588–600. <https://doi.org/10.1002/ird.2904>
- Werner, J., Grześkowiak, T., Zgoła-Grześkowiak, A., & Stanisław, E. (2018). Recent trends in microextraction techniques used in determination of arsenic species. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 105, 121–136. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.05.006>
- Wilson, T. M., Stewart, C., Sword-Daniels, V., Leonard, G. S., Johnston, D. M., Cole, J. W., Wardman, J., Wilson, G., & Barnard, S. T. (2012). Volcanic ash impacts on critical infrastructure. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 45–46, 5–23. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.06.006>
- Xing, L., Duan, N., Li, Q.-H., Liu, C.-G., Li, H.-Q., & Sun, G.-J. (2020). Variation in biomass allocation of *Nitraria tangutorum* during different phenological phases. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 44(7), 763–771. <https://doi.org/10.17521/cjpe.2019.0162>
- Yang, Y., Liu, T., Borch, T., Fang, L., Hu, S., Chi, W., Chen, G., Cheng, K., Wang, Q., Li, X., Yuan, X., & Li, F. (2024). Iron biogeochemical redox cycling dominantly controls cadmium availability in acidic paddy soils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 378, 186–202. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2024.06.029>
- Zhang, W., Wang, Z., Liu, Y., Feng, J., Han, J., & Yan, W. (2021). Effective removal of ammonium nitrogen using titanate adsorbent: Capacity evaluation focusing on cation exchange. *Science of The Total Environment*, 771, 144800. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144800>

- Zhou, P., Zhao, Y., Zhao, Z., & Chai, T. (2015). Source mapping and determining of soil contamination by heavy metals using statistical analysis, artificial neural network, and adaptive genetic algorithm. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3(4), 2569–2579. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.08.003>
- Zia, A., van den Berg, L., Ahmad, M. N., Riaz, M., Zia, D., & Ashmore, M. (2018). Controls on accumulation and soil solution partitioning of heavy metals across upland sites in United Kingdom (UK). *Journal of Environmental Management*, 222, 260–267. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.05.076>



## **DE LOS AUTORES**

**Irene del Carmen Gavilanes Terán**



Doctora en Química graduada en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Máster en Protección Ambiental y Magíster en Nutrición Clínica. Máster en Gestión Tratamiento y Valorización de Residuos Orgánicos con premio honorífico de graduación en la Universidad Miguel Hernández de Elche-España. Ganadora de una beca para estudios de doctorado “SENESCYT CONVOCATORIA 2011”. Doctora en Recursos y Tecnologías Agrarias, Agroambientales y Alimentarias en la Universidad Miguel Hernández de Elche-España, con grado honorífico de Cum laude. Directora del grupo de investigación GAIBAQ “Grupo Asociado de Investigación en Biotecnología, Ambiente y Química de la Facultad de Ciencias-ESPOCH. Su labor académica está centrada en estudios de Grado y posgrado. Directora y Co-directora de Tesis de Doctorado en la Universidad Miguel Hernández (España)\_ Profesora Externa de la UMH. Editora de la Revista indexada Perfiles. Miembro de la REC (Red Española de Compostaje) y RACAL (Red para el Análisis de la Calidad Ambiental en América Latina). Su campo investigativo está relacionado con la Gestión, Tratamiento y Valorización de Residuos orgánicos

generados en varios sectores (agrícolas, ganaderos, agroindustriales, urbanos) vinculando su actividad investigativa con la Seguridad Alimentaria y áreas de Salud. Producto de su trabajo ha participado en Congresos Nacionales e Internacional publicando los resultados de sus investigaciones en revistas científicas internacionales indexadas y de alto impacto, así como libros y congresos nacionales e internacionales. Co-autora de más de 40 obras de relevancia, y con producción científica en revistas de alto impacto investigativo Q1 (SJR <10%), además de revisora de artículos científicos para revistas indexadas de alto impacto. Ha dirigido y participado en proyectos nacionales e internacionales en colaboración con Empresas Públicas y Privadas, así como Universidades Internacionales. Fue la primera Profesora a tiempo Completo Principal 3 de la ESPOCH máximo nivel del Escalafón Docente ecuatoriano.

**Steven Stalin Ramos Romero**



Doctorando del programa de doctorado en Recursos y Tecnologías Agrarias, Agroambientales y Alimentarias por la Universidad Miguel Hernández de Elche (España). Máster Universitario en Tecnología Agroambiental para una Agricultura Sostenible por la Universidad Politécnica de Madrid (España), Ingeniero en Biotecnología Ambiental por la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (Ecuador), Docente en el Programa de Maestría en Agronomía con mención en Producción Agrícola Sostenible y Docente-investigador de la Universidad Politécnica Estatal del Carchi, se ha desempeñado como Técnico de Investigación en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, posee experiencia en manejo de equipos, métodos y procedimientos de análisis. Ha participado en el equipo de trabajo de 2 proyectos de investigación nacionales e internacionales y publicado artículos de divulgación científica en revistas internacionales de alto impacto, capítulos de libro y congresos nacionales e internacionales. Las líneas de investigación en las que actualmente se desempeña son la gestión de residuos y subproductos procedentes de sistemas agroindustriales, desarrollo de abonos orgánicos y

contaminación de suelos. Los resultados de sus investigaciones se plasman en obras de divulgación científica y proyectos sostenibles ejecutados en beneficio de la comunidad



### Julio César Idrovo Novillo



Doctor en Química (Escuela Superior Politécnica de Chimborazo - Ecuador). Ganador de una beca del *Ministero degli Affari Steri Italiano* para una estancia de actualización y especialización en Química Física y Espectroscopía Óptica (*Dipartimento di Chimica della Università degli Studi di Ferrara* – Italia). Máster en Dirección de Empresas (Escuela Superior Politécnica de Chimborazo - Ecuador). Máster en Ciencia y Tecnología Química (Universidad Nacional de Educación a Distancia - España). Doctor en Recursos y Tecnologías Agrarias, Agroambientales y Alimentarias con mención *cum laude* (Universidad Miguel Hernández de Elche - España). Profesor principal de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo con 37 años de experiencia. Director subrogante del Grupo Asociado de Investigación en Biotecnología, Ambiente y Química (GAIBAQ). Miembro de la Red Española de Compostaje (REC). Miembro de la Red para el Análisis de la Calidad Ambiental en América Latina (RACAL). Ha participado en la ejecución de varios proyectos de investigación nacionales e internacionales. Su trabajo investigativo comprende la gestión, tratamiento y valorización de residuos orgánicos en Ecuador. Ha presentado comunicaciones científicas en varios congresos nacionales e internacionales y ha publicado los resultados de sus investigaciones en revistas de alto impacto (SJR Q1).





PUERTO MADERO  
EDITORIAL

ISBN 978-631-6557-79-7



9 786316 557797