



Artículo original / Original article

## Evaluación de las concentraciones de cadmio en suelos de cultivares de arroz en diferentes niveles altitudinales en San Martín

### Assessment of Cadmium Concentrations in Rice Cultivars Soils at Different Altitudinal Levels in San Martín

Carmen Saraí Dioses-Vergara <sup>1\*</sup>; Junior Joseph Góngora-Vásquez <sup>1</sup>; Luis Alberto Ordeñez-Sánchez <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad César Vallejo, Tarapoto, Perú

Recibido: 25/04/2024

Aceptado: 30/06/2024

Publicado: 25/07/2024

\*Autor de correspondencia: [cdiosesv@ucvvirtual.edu.pe](mailto:cdiosesv@ucvvirtual.edu.pe)

**Resumen:** El uso excesivo de agroquímicos ha provocado acumulación de cadmio en suelos agrícolas, con riesgos para la salud y los ecosistemas. Este estudio evaluó las concentraciones de cadmio en suelos de cultivares de arroz a distintos niveles altitudinales en la región San Martín, Perú. Se empleó diseño cuantitativo cuasiexperimental, analizando tres variedades (Valor, Feron y Selva) a varias altitudes, con mediciones fisicoquímicas y ANOVA para contrastes. Los resultados evidenciaron concentraciones elevadas en todas las parcelas y una tendencia creciente con la altitud; la mayor se registró a 284 m s. n. m. Además, se observaron pH, materia orgánica y capacidad de intercambio catiónico bajos. Se concluye que la contaminación por cadmio es generalizada y se relaciona significativamente con la altitud. Se requieren prácticas agrícolas sostenibles y medidas de remediación, priorizando zonas altas. Se recomienda investigar mecanismos de acumulación por variedad y evaluar fitorremediación para resguardar la seguridad alimentaria y la salud pública.

**Palabras clave:** agroquímicos; contaminación; fitorremediación; metales pesados; suelos agrícolas

**Abstract:** The excessive use of agrochemicals has led to cadmium accumulation in agricultural soils, posing risks to health and ecosystems. This study evaluated cadmium concentrations in rice cultivar soils at different altitudes in the San Martín region of Peru. A quasi-experimental quantitative design was used, analyzing three varieties (Valor, Feron, and Selva) at various altitudes, with physicochemical measurements and ANOVA for contrasts. The results showed high concentrations in all plots and an increasing trend with altitude; the highest was recorded at 284 m s. n. m. In addition, low pH, organic matter, and cation exchange capacity were observed. It is concluded that cadmium contamination is widespread and significantly related to altitude. Sustainable agricultural practices and remediation measures are required, prioritizing high-altitude areas. It is recommended to investigate accumulation mechanisms by variety and evaluate phytoremediation to safeguard food safety and public health.

**Keywords:** agrochemicals; contamination; phytoremediation; heavy metals; agricultural soils

## 1. Introducción

El uso excesivo de agroquímicos a nivel mundial ha tenido consecuencias negativas en el ecosistema y la salud humana, incluyendo enfermedades cancerígenas y muertes por acumulación de metales pesados como el cadmio. Este metal altamente tóxico, presente en pesticidas y fertilizantes agrícolas, se acumula en suelos agrícolas, incrementando su concentración debido al uso excesivo de fertilizantes fosfatados (Flores & Novoa, 2022). A diferencia de los contaminantes orgánicos, los metales pesados como el cadmio no se degradan, persisten en el ambiente y dañan el ecosistema (Acuña & Gonzales, 2021).

En suelos agrícolas, el cadmio puede alcanzar niveles peligrosos por el uso de fertilizantes químicos, estiércol, fangos de depuración, riego con efluentes industriales y contaminación atmosférica de fuentes urbanas e industriales (Pernía et al., 2021). Particularmente, el uso prolongado de fertilizantes fosfatados, derivados de rocas fosfatadas con altas concentraciones de cadmio, es una fuente significativa de esta contaminación (Jara & Rueda, 2020). En cultivos de arroz, el cadmio es fitotóxico y afecta el crecimiento y la eficiencia en la absorción de nutrientes, disminuyendo el rendimiento del arroz (Zulkafflee et al., 2020). Las altitudes influyen en el movimiento del cadmio, ya que, a mayores altitudes, el transporte del metal hacia cuerpos de agua afecta al microbiota y otros ecosistemas (Arzube et al., 2022).

En el Perú, el arroz es el grano más consumido, con el 84% de su consumo cubierto por la producción nacional. En 2019, San Martín produjo 770,000 toneladas, siendo una de las principales regiones productoras, junto con Amazonas, La Libertad, Lambayeque y Piura (Ríos & Saavedra, 2019). La producción de arroz en San Martín ha crecido significativamente debido a la abundancia de agua y alta productividad, y se espera que siga mejorando (Lozano & Suárez, 2022).

La creciente preocupación por la acumulación de cadmio en suelos agrícolas ha motivado estudios detallados sobre sus efectos y las posibles soluciones (Ishikawa, 2020). En particular, se ha observado que el cadmio puede alterar significativamente la fisiología de las plantas, interfiriendo con procesos vitales como la fotosíntesis, la respiración y la absorción de nutrientes esenciales como el nitrógeno (Zulkafflee et al., 2020). Esto no solo reduce el crecimiento y la productividad de los cultivos, sino que también representa un riesgo para la salud humana, ya que el cadmio puede ingresar a la cadena alimentaria a través de las plantas cultivadas en suelos contaminados (Acuña & Gonzales, 2021).

La investigación en la región San Martín es crucial, dado su papel prominente en la producción de arroz. Las técnicas de siembra por repique y al voleo utilizadas en la región presentan diferentes impactos en la distribución y absorción de cadmio en el suelo (Acuña & Gonzales, 2021). Analizar estas prácticas permitirá identificar las más sostenibles y efectivas para minimizar la contaminación por cadmio (Acuña & Gonzales, 2021). Además, es fundamental considerar la variabilidad altitudinal en la región, ya que a mayores altitudes el transporte de cadmio por escorrentías puede intensificarse, afectando no solo a los cultivos, sino también a los ecosistemas acuáticos cercanos (Arzube et al., 2022).

Para abordar estos desafíos, es necesario realizar análisis fisicoquímicos exhaustivos de los suelos cultivados con arroz. Estos análisis ayudarán a determinar el grado de degradación del suelo y los niveles de cadmio presentes. Por lo que, basado en lo anterior, el objetivo de la presente investigación es evaluar los niveles de concentraciones de cadmio en suelos de cultivares de arroz en diferentes niveles altitudinales en San Martín, con la finalidad de identificar las variaciones en la contaminación de este metal pesado según la altitud. Esto permitirá determinar las áreas de mayor riesgo para la salud humana y el medio ambiente, optimizar prácticas agrícolas, y desarrollar estrategias de mitigación para garantizar la producción de arroz seguro y sostenible en la región.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1.1 Tipo y diseño de investigación

La investigación fue de tipo aplicada, orientada a generar conocimiento relevante sobre las variables de investigación. Tuvo un enfoque cuantitativo, que incluyó identificación de la pregunta de investigación, revisión de la literatura, creación del marco teórico y planteamiento de hipótesis con variables definidas. El diseño del estudio fue cuasiexperimental, manipulando al menos una variable independiente con grupos preestablecidos, sin asignación aleatoria de unidades experimentales.

### 2.1.2 Población, muestra y muestreo

La población del presente estudio comprendió a las 112 mil hectáreas de cultivo de arroz que se siembran región San Martín, abasteciendo al mercado local y nacional. Posteriormente, se planteó la muestra comprendida por 3 hectárea por cada variedad de arroz Valor, Feron y Selva; se tomaron 15 kg de suelos para muestras, 65 plantas de arroz en el análisis foliar y 15 muestras de granos frescos y secos. La división para la extracción de muestras fue en base a la Guía para el muestreo de suelos en el marco del Decreto Supremo N° 002 - 2013 - MINAM, Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para el suelo.

El muestreo fue probabilístico, pues todas las plantas de arroz y suelos que comprenden los cultivos de arroz tuvieron la misma oportunidad de ser parte de la muestra con esta medida de elección. De esta forma, la unidad de análisis: Se tomaron un total de 15 submuestras de suelo para análisis de características fisicoquímicas y cantidad de cadmio en las tres variedades de arroz, 65 plantas de arroz para la evaluación de cadmio en los tejidos y 15 muestras de granos de arroz.

### 2.1.3 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Las técnicas de recolección de datos utilizadas en esta investigación incluyeron la observación y el análisis documental. Durante las etapas de gabinete y campo, la observación se empleó para compilar información necesaria que luego se registró en una ficha de obtención de datos. El análisis documental se basó en artículos y estudios previos relacionados, los cuales sirvieron de guía para la adecuada evaluación del cadmio en suelos y granos de arroz. Además, se utilizó una guía para el muestreo de suelos, estableciendo el tipo, nivel y procedimientos necesarios para el muestreo, que posteriormente serían enviados al laboratorio para análisis fisicoquímicos.

En cuanto a los instrumentos de recolección de datos, se emplearon la observación directa y la ficha de recolección de datos. La observación directa permitió una comprensión clara y detallada de los fenómenos observados durante la etapa de campo, abarcando cada aspecto relacionado con la evaluación de suelos y granos de arroz. La ficha de recolección de datos se centró en registrar variables clave de la investigación, como las características fisicoquímicas del suelo y la concentración de cadmio en suelos y tejidos vegetales.

**Tabla 1.** Validación de expertos

Ítem	Expertos	Grado	Puntaje
1	William Ruiz Ramírez	Maestría	90%
2	Carlos Verde Girbau	Maestría	95%
3	Sheyla Perez Gallardo	Maestría	90%

La confiabilidad se determinó mediante el análisis de varianza que  $p \leq 0.05$  de acuerdo a los datos obtenidos de los análisis de las características fisicoquímicas del suelo y concentración de cadmio en suelo, tejidos vegetales y granos de las tres variedades de arroz a diferentes niveles altitudinales en la región San Martín.

### 2.1.4 Método de análisis de datos

El método de análisis de datos fue mediante análisis de varianza (ANOVA) con un valor de significancia de  $p \geq 0.05$  con un factor de clasificación llamado Diseño de Bloques Completamente Aleatorio (DBCA), de los datos de las tres parcelas de cultivo de arroz en base a las submuestras. Seguidamente se realizó la prueba Post Hoc con análisis de medios en Tukey.

### 3. Resultados y discusiones

#### 3.1. Resultados

Se realizó un análisis de varianza ANOVA a las concentraciones de cadmio en suelos de cultivo de arroz de las variedades SELVA, FERON y VALOR, datos obtenidos bajo los procesos estadísticos de  $R^2$  de X. Los datos no muestran diferencias significativas en los factores determinados como parcelas, altitudes y la combinación entre los factores parcelas\*altitudes, lo que demostró que en todas las parcelas evaluadas las concentraciones de cadmio son altas con bajas diferencias significativas por encontrarse en mismo rango de cantidades (Tabla 2).

**Tabla 2.** Análisis de varianza de presencia de cadmio en el suelo de cultivos de arroz a diferentes niveles altitudinales

Origen	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	0,703	8	0,088	0,531	0,825ns
Parcelas	0,603	2	0,301	1,822	0,176ns
Altitudes	0,065	2	0,032	0,196	0,823ns
Parcelas * Altitudes	0,035	4	0,009	0,053	0,994ns
Error	5,955	36	0,165		
Total	91,970	45			

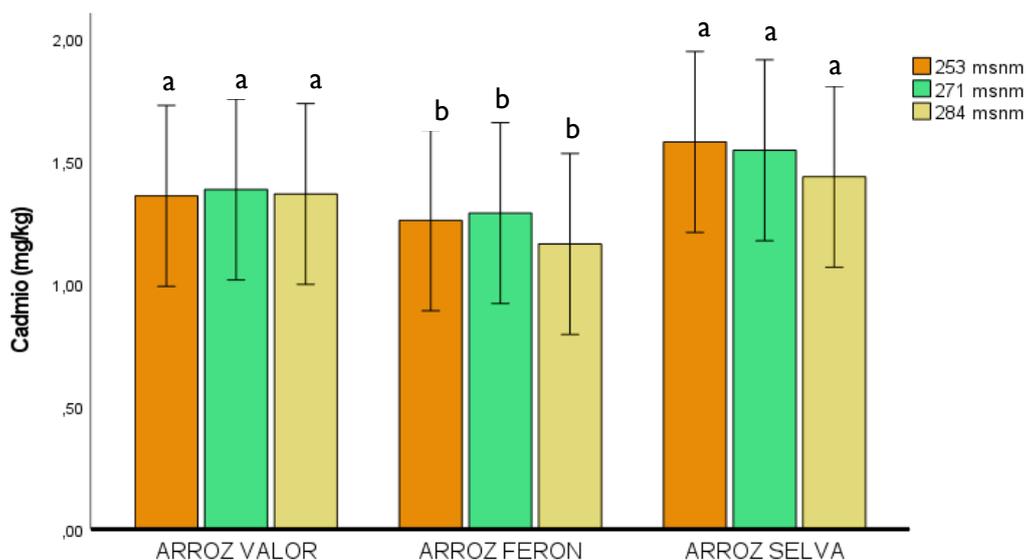
a.  $R^2 = 0,106$

C.V: 3,86%

ns: no significativo

\*\* : alta significancia

Se muestra la desviación de estándar de las concentraciones de cadmio en el suelo. Bajo los promedios de las diferentes unidades muestreadas de las parcelas de cultivares de arroz; evidenciando las diferencias significativas bajo la prueba de Tukey con valor de  $p < 0,05$  (Figura 1).



**Figura 1.** Presencia de cadmio en el suelo en las tres variedades de arroz a diferentes niveles altitudinales

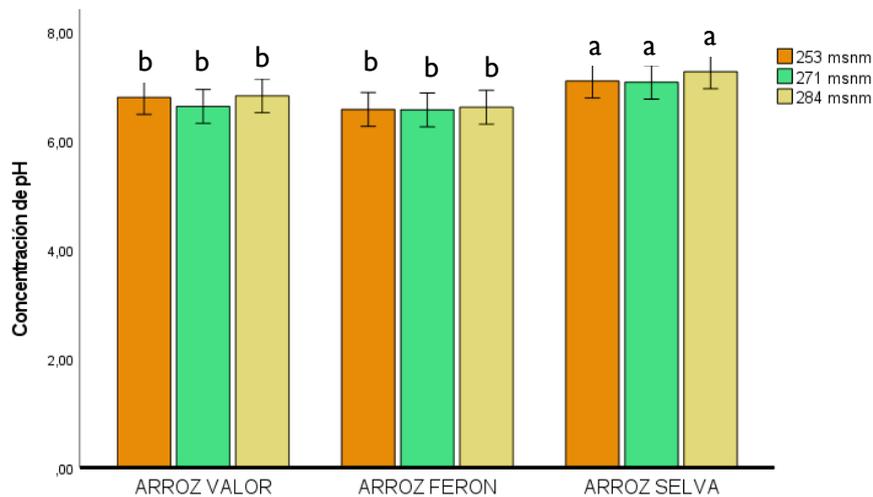
De igual forma, el análisis de varianza ANOVA a las concentraciones de pH en suelos de cultivo de arroz de las variedades SELVA, FERON y VALOR, los datos obtenidos bajo los procesos estadísticos de  $R^2$  de X. Los datos muestran diferencias significativas en el factor determinado como parcelas y no presentaron significancia en el factor altitudes y la combinación entre los factores parcelas\*altitudes, lo que demostró que en los cultivares de arroz evaluadas las concentraciones de pH son bajas las diferencias significativas por encontrarse en mismo rango las cantidades (Tabla 3).

**Tabla 3.** Análisis de varianza de presencia de pH en el suelo de cultivos de arroz a diferentes niveles altitudinales

Origen	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	2,712	8	,339	2,875	0,014**
Parcelas	2,485	2	1,243	10,536	0,000**
Altitudes	0,158	2	0,079	0,668	0,519ns
Parcelas * Altitudes	0,069	4	0,017	0,147	0,963ns
Error	4,245	36	0,118		
Total	2107,524	45			

a.  $R^2 = 0,390$   
 C.V: 6,28%  
 ns: no significativo  
 \*\*: alta significancia

Por lo tanto, se muestra la desviación de estándar de las concentraciones de pH en el suelo. Bajo los promedios de las diferentes unidades muestreadas de las parcelas de cultivares de arroz; evidenciando las diferencias significativas bajo la prueba de Tukey con valor de  $p < 0,05$  (Figura 2).



**Figura 2.** Presencia de pH en el suelo en las tres variedades de arroz a diferentes niveles altitudinales

De esta manera, el análisis de varianza ANOVA a las concentraciones de materia orgánica en suelos de cultivo de arroz de las variedades SELVA, FERON y VALOR, los datos obtenidos bajo los procesos estadísticos de  $R^2$  de X. Los datos muestran diferencias significativas en el factor determinado como parcelas y no presentaron significancia en el factor altitudes y la combinación entre los factores parcelas\*altitudes, lo que demostró que en los cultivares de arroz evaluadas las concentraciones de materia orgánica son bajas las diferencias significativas por encontrarse en mismo rango las cantidades obtenidas (Tabla 4).

**Tabla 4.** Análisis de varianza de la cantidad de materia orgánica en el suelo de cultivos de arroz a diferentes niveles altitudinales

Origen	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	1,995	8	0,249	7,754	0,000**
Parcelas	1,806	2	0,903	28,080	0,000**
Altitudes	0,108	2	0,054	1,677	0,201ns
Parcelas * Altitudes	0,081	4	0,020	0,630	0,645ns
Error	1,158	36	0,032		
Total	299,603	45			

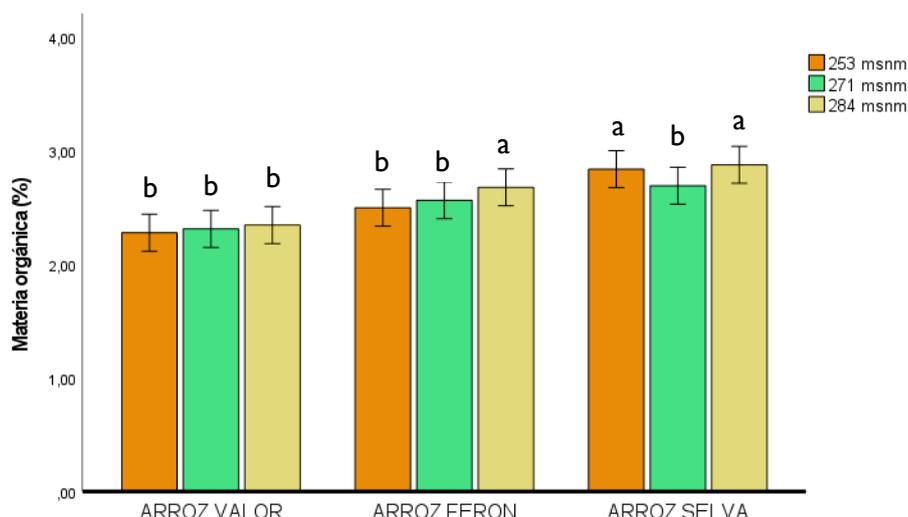
a.  $R^2 = 0,633$ 

C.V: 4,42%

ns: no significativo

\*\*: alta significancia

Posteriormente, se muestra la desviación de estándar de las concentraciones de materia orgánica en el suelo. Bajo los promedios de las diferentes unidades muestreadas de las parcelas de cultivares de arroz; evidenciando las diferencias significativas bajo la prueba de Tukey con valor de  $p < 0,05$  (Figura 3).

**Figura 3.** Presencia de materia orgánica en el suelo en las tres variedades de arroz a diferentes niveles altitudinales

Asimismo, el análisis de varianza ANOVA a las concentraciones de la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) en suelos de cultivo de arroz de las variedades SELVA, FERON y VALOR, los datos obtenidos bajo los procesos estadísticos de  $R^2$  de X. Los datos muestran diferencias significativas en el factor determinado como parcelas y no presentaron significancia en el factor altitudes y la combinación entre los factores parcelas\*altitudes, lo que demostró que en los cultivares de arroz evaluadas las concentraciones de CIC son bajas las diferencias significativas por encontrarse en mismo rango las cantidades obtenidas (Tabla 5).

**Tabla 5.** Análisis de varianza de la CIC en el suelo de cultivos de arroz a diferentes niveles altitudinales

Origen	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	399,760	8	49,970	4,242	0,001**

Parcelas	369,415	2	184,708	15,681	0,000**
Altitudes	28,519	2	14,259	1,211	0,310ns
Parcelas * Altitudes	1,826	4	0,457	0,039	0,997ns
Error	424,048	36	11,779		
Total	18190,283	45			

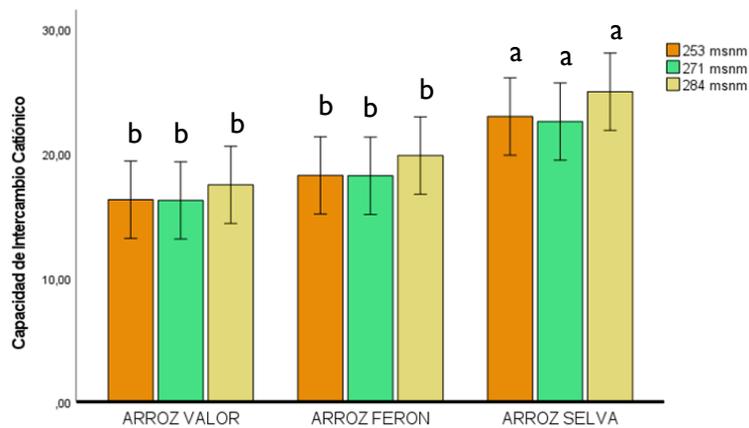
a. R<sup>2</sup> = 0,485

C.V: 7,22%

ns: no significativo

\*\* : alta significancia

De acuerdo, a la desviación de estándar de las concentraciones de Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) en el suelo. Bajo los promedios de las diferentes unidades muestreadas de las parcelas de cultivares de arroz; evidenciando las diferencias significativas bajo la prueba de Tukey con valor de p<0,05 (Figura 4).



**Figura 4.** Presencia de CIC en el suelo en las tres variedades de arroz a diferentes niveles altitudinales

Igualmente, el análisis de varianza ANOVA a las concentraciones de nitrógeno en suelos de cultivo de arroz de las variedades SELVA, FERON y VALOR, los datos obtenidos bajo los procesos estadísticos de R<sup>2</sup> de X. Los datos muestran diferencias significativas en el factor determinado como parcelas y no presentaron significancia en el factor altitudes y la combinación entre los factores parcelas\*altitudes, lo que demostró que en los cultivares de arroz evaluadas las concentraciones de nitrógeno son bajas las diferencias significativas por encontrarse en mismo rango las cantidades obtenidas (Tabla 6).

**Tabla 6.** Análisis de varianza de la cantidad de nitrógeno en el suelo de cultivos de arroz a diferentes niveles altitudinales

Origen	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	1,018a	8	0,127	3,541	0,004**
Parcelas	0,896	2	0,448	12,458	0,000**
Altitudes	0,050	2	0,025	0,701	0,503ns
Parcelas * Altitudes	0,072	4	0,018	0,502	0,734ns
Error	1,294	36	0,036		
Total	60,863	45			

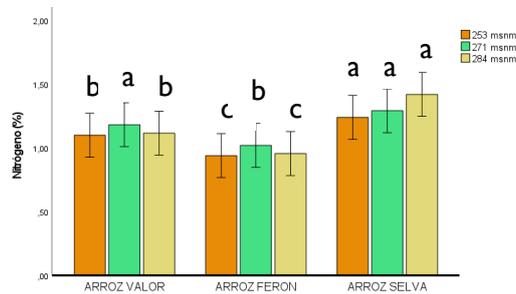
a. R<sup>2</sup> = ,440

C.V: 7,22%

ns: no significativo

\*\* : alta significancia

Asimismo, de la desviación de estándar de las concentraciones de nitrógeno (N) en el suelo. Bajo los promedios de las diferentes unidades muestreadas de las parcelas de cultivares de arroz; evidenciando las diferencias significativas bajo la prueba de Tukey con valor de  $p < 0,05$  (Figura 5).



**Figura 5.** Presencia de nitrógeno en el suelo en las tres variedades de arroz a diferentes niveles altitudinales

De igual manera, el análisis de varianza ANOVA a las concentraciones de fósforo en suelos de cultivo de arroz de las variedades SELVA, FERON y VALOR, los datos obtenidos bajo los procesos estadísticos de  $R^2$  de X. Los datos no muestran diferencias significativas en los factores determinado como parcelas, altitudes y la combinación entre los factores parcelas\*altitudes, lo que demostró que en los cultivares de arroz evaluadas las concentraciones de fósforo son bajas las diferencias significativas por encontrarse en mismo rango las cantidades obtenidas (Tabla 7).

**Tabla 7.** Análisis de varianza de la cantidad de fósforo en el suelo de cultivos de arroz a diferentes niveles altitudinales

Origen	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	0,096	8	0,012	0,753	0,645ns
Parcelas	0,008	2	0,004	0,251	0,779ns
Altitudes	0,055	2	0,028	1,746	0,189ns
Parcelas * Altitudes	0,032	4	0,008	0,508	0,730ns
Error	0,572	36	0,016		
Total	1,054	45			

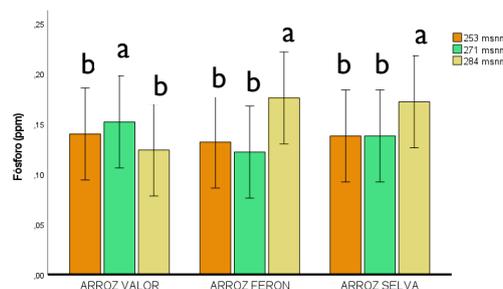
a.  $R^2 = 0,143$

C.V: 3,92%

ns: no significativo

\*\* : alta significancia

De esta manera, la desviación de estándar de las concentraciones de fósforo (P) en el suelo. Bajo los promedios de las diferentes unidades muestreadas de las parcelas de cultivares de arroz; evidenciando las diferencias significativas bajo la prueba de Tukey con valor de  $p < 0,05$  (Figura 6).



**Figura 6.** Presencia de fósforo en el suelo en las tres variedades de arroz a diferentes niveles altitudinales

También, el análisis de varianza ANOVA a las concentraciones de potasio en suelos de cultivo de arroz de las variedades SELVA, FERON y VALOR, los datos obtenidos bajo los procesos estadísticos de  $R^2$  de X. Los datos muestran diferencias significativas en el factor determinado como parcelas y no presentan significancia en los factores altitudes y la combinación entre los factores parcelas\*altitudes, lo que demostró que en los cultivares de arroz evaluadas las concentraciones de potasio son bajas las diferencias significativas por encontrarse en mismo rango las cantidades obtenidas (Tabla 8).

**Tabla 8.** Análisis de varianza de la cantidad de potasio en el suelo de cultivos de arroz a diferentes niveles altitudinales

Origen	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	11030,516	8	1378,815	4,827	0,000**
Parcelas	9243,849	2	4621,925	16,182	0,000**
Altitudes	893,333	2	446,667	1,564	0,223ns
Parcelas * Altitudes	893,333	4	223,333	0,782	0,544ns
Error	10282,456	36	285,624		
Total	1363658,270	45			

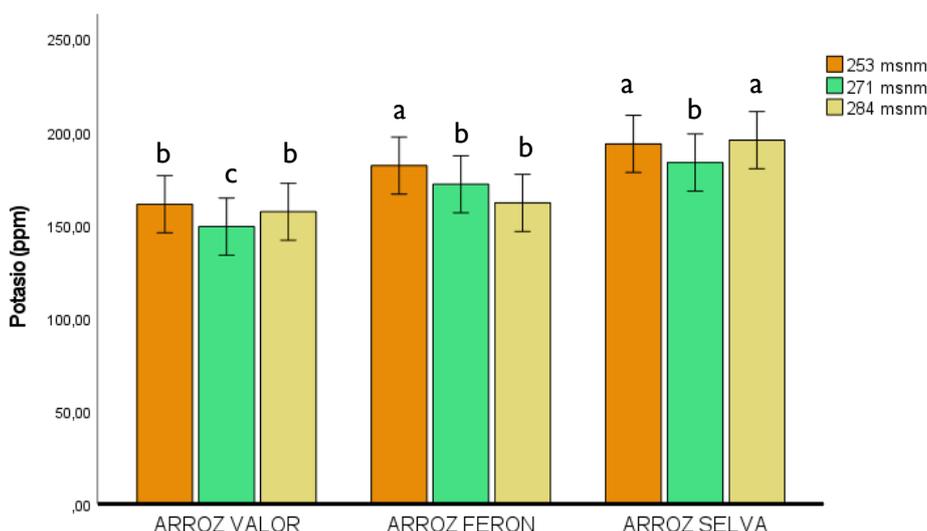
a.  $R^2 = 0,518$

C.V: 1,69%

ns: no significativo

\*\* : alta significancia

De esta manera, la desviación de estándar de las concentraciones de potasio (K) en el suelo. Bajo los promedios de las diferentes unidades muestreadas de las parcelas de cultivares de arroz; evidenciando las diferencias significativas bajo la prueba de Tukey con valor de  $p < 0,05$  (Figura 7).



**Figura 7.** Presencia de potasio en el suelo en las tres variedades de arroz a diferentes niveles altitudinales

Además, el análisis de varianza ANOVA a las concentraciones de magnesio en suelos de cultivo de arroz de las variedades SELVA, FERON y VALOR, los datos obtenidos bajo los procesos estadísticos de  $R^2$  de X. Los datos muestran diferencias significativas en el factor determinado como parcelas y no presentan significancia en los factores altitudes y la combinación entre los factores parcelas\*altitudes, lo que demostró que en los cultivares de arroz evaluadas las concentraciones de magnesio son bajas las diferencias significativas por encontrarse en mismo rango las cantidades obtenidas (Tabla 9).

**Tabla 9.** Análisis de varianza de la cantidad de magnesio en el suelo de cultivos de arroz a diferentes niveles altitudinales

Origen	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	5,317	8	,665	3,432	0,005**
Parcelas	4,513	2	2,256	11,652	0,000**
Altitudes	0,722	2	0,361	1,864	0,170ns
Parcelas * Altitudes	0,083	4	0,021	0,107	0,979ns
Error	6,971	36	0,194		
Total	212,169	45			

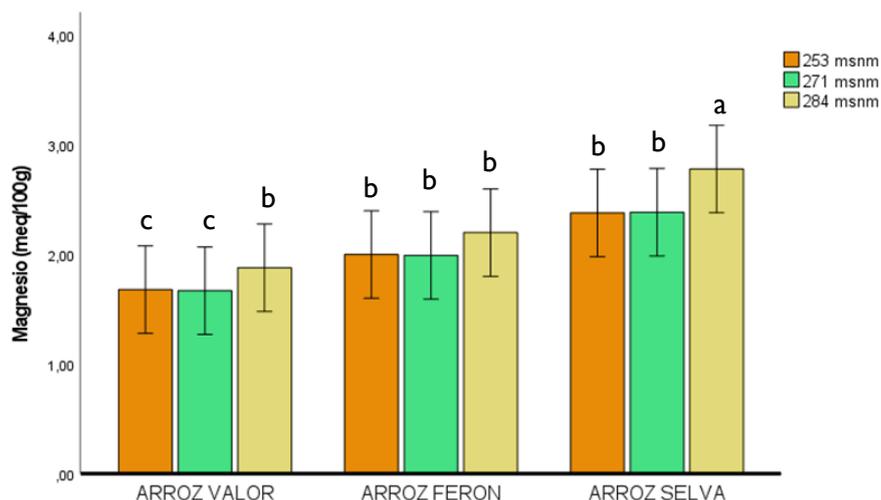
a.  $R^2 = 0,433$

C.V: 3,25%

ns: no significativo

\*\* : alta significancia

Finalmente, la desviación de estándar de las concentraciones de magnesio (Mg) en el suelo. Bajo los promedios de las diferentes unidades muestreadas de las parcelas de cultivares de arroz; evidenciando las diferencias significativas bajo la prueba de Tukey con valor de  $p < 0,05$  (Figura 8).

**Figura 8.** Presencia de magnesio en el suelo en las tres variedades de arroz a diferentes niveles altitudinales

### 3.2. Discusión

Los resultados revelaron que las concentraciones de cadmio eran generalmente altas en todas las parcelas analizadas, con pequeñas diferencias entre ellas, lo que coincide con reportes de arroz en Colombia y Asia donde el Cd en suelos arroceros puede alcanzar niveles preocupantes y transferirse al cultivo (Kormoker et al., 2022; Tariq et al., 2021; Torrente et al., 2020). Se identificó una relación significativa entre la altitud y los niveles de cadmio en el suelo, observándose que a mayor altitud las concentraciones tendían a aumentar; este patrón es coherente con hallazgos en la región San Martín para cacao, donde las propiedades del suelo a distintos pisos altitudinales se correlacionan con el Cd (Irigoin & Trigos, 2022).

El análisis mostró que el 58 % de la variación del Cd se explicó por la altitud y el 42 % por otros factores; entre estos, la acidez y la baja capacidad de intercambio catiónico (CIC) favorecen la disponibilidad del metal, tal como señalan revisiones y textos de referencia (Bayona-Penagos, 2021; Garavito, 1974). La mayor concentración de Cd se encontró a 284 m s. n. m., consistente con el comportamiento observado en agroecosistemas arroceros con manejo intensivo (Torrente et al., 2020).

Además del cadmio, se evaluaron otros parámetros del suelo. El pH y la materia orgánica presentaron niveles bajos en todas las parcelas; ambos reducen la retención de Cd y aumentan su movilidad, especialmente cuando la CIC es baja (Bayona-Penagos, 2021; Garavito, 1974). La CIC mostró valores bajos con diferencias significativas entre parcelas, coherentes con la literatura sobre el papel de la CIC en la retención de cationes metálicos (Bayona-Penagos, 2021). Las concentraciones de nitrógeno, fósforo, potasio y magnesio fueron similares en todas las parcelas, un patrón reportado también en trabajos regionales sobre suelos arroceros (Tineo & Periche, 2019).

Estos hallazgos aportan evidencia sobre la distribución del Cd en suelos arroceros de San Martín y son útiles para diseñar estrategias de manejo, especialmente en zonas más altas. En ese sentido, la bibliografía recomienda combinar enfoques: (i) prácticas de remediación y enmiendas (dolomita, humus, abonos y biocarbón) para inmovilizar Cd (Huaraca et al., 2020; Lozano & Suárez, 2022; Ríos & Saavedra, 2019), (ii) fitotecnologías como la fitoextracción/estabilización en rotación o previo al arroz (Hu et al., 2019), y (iii) selección de variedades/rasgos de raíz que reduzcan translocación a la parte aérea y grano (Fu et al., 2019; Ishikawa, 2020). En contextos de uso intensivo de agroquímicos en arroz de San Martín se ha documentado contaminación de suelo por metales, por lo que las medidas de manejo y remediación local (p. ej., microorganismos eficaces, carbón activado, subproductos de cacao) resultan pertinentes, aunque con eficacia variable (Acuña & Gonzales, 2021; Del Castillo & Encina, 2021; Paredes & Romero, 2021).

La presencia de Cd en el sistema suelo-arroz implica riesgos para la salud pública reportados en diversos países; por ello, cualquier estrategia debe apuntar a disminuir la biodisponibilidad y la entrada al grano (Kormoker et al., 2022; Tariq et al., 2021; Zulkafflee et al., 2020).

#### 4. Conclusiones

Se encontró que las concentraciones de cadmio eran generalmente elevadas en todas las parcelas analizadas, con pequeñas variaciones entre ellas. Esto sugiere una contaminación generalizada por cadmio en los suelos agrícolas dedicados al cultivo de arroz en la región de San Martín. Este hallazgo es preocupante debido a los riesgos potenciales para la salud humana y el medio ambiente asociados con altos niveles de cadmio en el suelo y su posible acumulación en los cultivos.

Asimismo, se identificó una relación significativa entre la altitud y los niveles de cadmio en el suelo. Específicamente, se observó una tendencia al aumento de las concentraciones de cadmio a medida que aumentaba la altitud, con la mayor concentración encontrada a 284 metros sobre el nivel del mar. Este patrón podría estar relacionado con procesos de lixiviación y acumulación de cadmio en zonas más elevadas, lo que tiene implicaciones importantes para la gestión de cultivos en diferentes niveles altitudinales.

Además, el estudio reveló que otros parámetros del suelo, como el pH, la materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico (CIC), presentaban niveles generalmente bajos en todas las parcelas. Estos factores podrían estar influyendo en la biodisponibilidad y movilidad del cadmio en el suelo, lo que a su vez podría afectar su absorción por parte de las plantas de arroz. Esta información es crucial para desarrollar estrategias de manejo del suelo que puedan mitigar la absorción de cadmio por los cultivos.

Por último, estos hallazgos subrayan la necesidad de implementar prácticas agrícolas sostenibles y medidas de remediación en la región de San Martín, especialmente en las zonas de mayor altitud donde el riesgo de acumulación de cadmio parece ser más elevado. Se recomienda realizar investigaciones adicionales para comprender mejor los mecanismos de acumulación de cadmio en diferentes variedades de arroz y explorar técnicas de fitorremediación o estrategias de manejo del suelo que puedan reducir la biodisponibilidad del cadmio. Además, es fundamental establecer un monitoreo continuo de los niveles de cadmio en

los suelos agrícolas y en los granos de arroz para garantizar la seguridad alimentaria y proteger la salud pública en la región.

### Agradecimiento

Los autores agradecen a la Universidad César Vallejo por su apoyo institucional, al personal del laboratorio de análisis de suelos por su asistencia técnica, y a los agricultores de la región de San Martín por su cooperación. Extendemos nuestro reconocimiento a los asesores del área de investigación por sus valiosas sugerencias. Finalmente, expresamos nuestra gratitud a la Revista y a las personas revisoras anónimas por sus constructivas observaciones que han mejorado significativamente este artículo.

### Financiamiento

Ninguno

### Conflicto de intereses

Los autores afirman haber observado rigurosamente todos los protocolos éticos y legales aplicables, tanto durante la investigación como en la elaboración del manuscrito. Aseguran la ausencia de cualquier conflicto de intereses.

### Contribución de autoría

D-V, C. S. y G-V, J. J.: Conceptualización, análisis formal, investigación, metodología, curación de datos, escritura (preparación del borrador final) y supervisión.

### Referencias bibliográficas

- Acuña, S., & Gonzales, D. (2021). *Impacto ambiental del suelo del cultivo de arroz por uso de plaguicidas, con remediación de miel de cacao, Tarapoto, 2021* [Universidad Cesar Vallejo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/75235>
- Arzube Mayorga, M. P., León Mejía, Á. R., Ramírez Flores, L. C., & Sánchez Saavedra, R. J. (2022). Evaluación de cultivares de (*Oryza sativa* L.), a la calidad de agua de riego en Manglaralto, Santa Elena. *Revista de Investigación Talentos*, 9(2), 136-145. <https://doi.org/10.33789/talentos.9.2.176>
- Bayona-Penagos, L. V. (2021). Efecto y mitigación de la toxicidad por arsénico y cadmio en cultivo de arroz. *Ciencias Agropecuarias*, 6(2), 49-70. <https://doi.org/10.36436/24223484.327>
- Del Castillo Navarro, H., & Encina Rimachi, J. (2021). *Evaluación del suelo, por metales pesados, producto del uso de agroquímicos en cultivos de arroz, Mishquiyacu, Tarapoto, 2021* [Universidad César Vallejo]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/84581>
- Flores, A., & Novoa, L. (2022). *Determinación de las concentraciones de plomo y cadmio en diferentes marcas de arroz (Oryza sativa) expendidos en el mercado Huamantanga – Puente Piedra durante el periodo noviembre- diciembre 2021* [Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. <https://hdl.handle.net/20.500.12672/18916>
- Fu, H., Yu, H., Li, T., & Wu, Y. (2019). Effect of cadmium stress on inorganic and organic components in xylem sap of high cadmium accumulating rice line (*Oryza sativa* L.). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 168, 330-337. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.10.023>

- Garavito Neira, F. (1974). *Propiedades químicas de los suelos*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/18436>
- Hu, P., Zhang, Y., Dong, B., Gao, W., Cheng, C., Luo, Y., Christie, P., & Wu, L. (2019). Assessment of phytoextraction using *Sedum plumbizincicola* and rice production in Cd-polluted acid paddy soils of south China: A field study. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 286, 106651. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106651>
- Huaraca-Fernandez, J. N., Pérez-Sosa, L., Bustinza-Cabala, L. S., & Pampa-Quispe, N. B. (2020). Enmiendas orgánicas en la inmovilización de cadmio en suelos agrícolas contaminados: una revisión. *Información Tecnológica*, 31(4), 139-152. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642020000400139>
- Irigoin Quintana, V., & Trigos Tuesta, L. P. (2022). *Determinación de la correlación de las propiedades físicas y químicas del suelo con los contenidos de cadmio y la colonización micorrízica en "cacao" Theobroma cacao L. como monocultivo en diferentes pisos altitudinales de la Región San Martín, Perú* [Universidad Católica Sedes Sapientiae]. <https://hdl.handle.net/20.500.14095/1631>
- Ishikawa, S. (2020). Mechanisms of cadmium accumulation in rice grains and molecular breeding for its reduction. *Soil Science and Plant Nutrition*, 66(1), 28-33. <https://doi.org/10.1080/00380768.2020.1719806>
- Jara, B., & Rueda, D. (2020). *Evaluación de los Niveles de Cadmio en Cultivos de Arroz a Nivel de Suelo y Grano, Ubicados en la Vereda Canaguaro del Municipio de Granada Meta* [Universidad Santo Tomás]. <http://hdl.handle.net/11634/28273>
- Kormoker, T., Proshad, R., Islam, M. S., Tusher, T. R., Uddin, M., Khadka, S., Chandra, K., & Sayeed, A. (2022). Presence of toxic metals in rice with human health hazards in Tangail district of Bangladesh. *International Journal of Environmental Health Research*, 32(1), 40-60. <https://doi.org/10.1080/09603123.2020.1724271>
- Lozano, M., & Suárez, M. (2022). *Remediación del suelo del cultivo de arroz, con dolomita y humus, Cacatachi, 2022* [Universidad Cesar Vallejo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/105119>
- Paredes García, F. de M., & Romero Panduro, D. M. (2021). *Remediación de suelo agrícola dedicado al cultivo de arroz con concentraciones de cadmio, mediante la aplicación de microorganismos eficaces y carbón activado* [Universidad César Vallejo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/61772>
- Pernía, B., Añazco, K., Mero, M., Mayía, Y., & Cobos, P. (2021). Efectos del cadmio sobre la germinación y crecimiento inicial de cinco variedades de *Oryza sativa* L. cultivadas en Ecuador. *Acta Agronómica*, 70(1), 82-92. <https://doi.org/10.15446/acag.v70n1.87636>
- Ríos, S., & Saavedra, W. (2019). *Mejoramiento de suelos en cultivos de arroz a través del abonamiento con cascarilla de café y agua miel de cacao, 2019* [Universidad Cesar Vallejo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/48688>
- Tariq, F., Wang, X., Saleem, M. H., Khan, Z. I., Ahmad, K., Saleem Malik, I., Munir, M., Mahpara, S., Mehmood, N., Ahmad, T., Memona, H., Ugulu, I., Fiaz, S., & Ali, S. (2021). Risk Assessment of Heavy Metals in Basmati Rice: Implications for Public Health. *Sustainability*, 13(15), 8513. <https://doi.org/10.3390/su13158513>
- Tineo Nuñez, B. G., & Periche Viera, R. E. (2019). *Evaluación del contenido de metales pesados en la margen izquierda del valle del río Tumbes y su absorción por el cultivo de arroz durante el periodo Marzo - Julio 2018* [Universidad Nacional de Tumbes]. <http://repositorio.untumbes.edu.pe/handle/UNITUMBES/383>
- Torrente Trujillo, A., Calderón Manchola, L. V., & Joven Santofimio, E. M. (2020). Metales en suelos productores de arroz del distrito Juncal, Huila - Colombia. *Suelos Ecuatoriales*, 50(1y2), 1-12. [https://doi.org/10.47864/SE\(50\)2020p1-12\\_121](https://doi.org/10.47864/SE(50)2020p1-12_121)

Zulkafflee, N. S., Redzuan, N. A. M., Selamat, J., Ismail, M. R., Praveena, S. M., & Razis, A. F. A. (2020). Evaluation of Heavy Metal Contamination in Paddy Plants at the Northern Region of Malaysia Using ICPMS and Its Risk Assessment. *Plants*, 10(1), 3. <https://doi.org/10.3390/plants10010003>