

# ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS EFECTOS DE LA COCCIÓN Y ENSILAJE EN LA ARRACACHA XANTHORRHIZA B. ECOTIPO AMARILLO PARA LA REDUCCIÓN DE SUSTANCIAS TÓXICAS

Milciades Aníbal Baltazar Ruiz<sup>\*1</sup>, Mónica Giuliana Baltazar Cerrón<sup>\*</sup>, Rubén Gelacio Caballero Salas<sup>\*</sup>, Vilma Luisa Aguilar Huaroc<sup>\*\*</sup>, Vitelio Asencios Tarazona<sup>\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, Junín, Perú.

<sup>\*\*</sup>Universidad Nacional Intercultural de la Selva Central Juan Santos Atahualpa, Junín, Perú.

<sup>\*\*\*</sup>Universidad Nacional Intercultural de la Amazonía, Pucallpa, Ucayali, Perú.

## RESUMEN

La arracacha (*Arracacia xanthorrhiza* B.) ecotipo amarillo es una planta tradicional andina del Perú que presenta importantes valores nutricionales para el consumo humano y animal. Sin embargo, contiene componentes tóxicos como el ácido cianhídrico y los glucósidos cianogénicos que son dañinos para la salud. Los métodos para reducir estas componentes son la cocción y el ensilaje. El objetivo del artículo es determinar el efecto de la cocción húmeda de raíces y el ensilaje de follaje en la reducción de los niveles de ácido cianhídrico (HCN) en esta planta, para el consumo seguro humano y animal en el marco del ODS-2030-2. El estudio aplica técnicas estadísticas sobre diferentes temperaturas y tiempos de cocción, así como tiempo de ensilaje. Se empleó un diseño factorial como diseño de experimento, con transformación logarítmica Log(n) para normalizar las distribuciones de HCN y cianuros; el ANOVA se ejecutó sobre datos transformados y los resultados se retrotransformaron a unidades originales (mg) para su interpretación. Se verificaron los supuestos de homogeneidad de varianzas mediante la prueba de Levene. Los resultados confirmaron diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,001$ ) para todos los factores e interacciones evaluados.

**PALABRAS CLAVES:** Análisis de Varianza (ANOVA), Prueba de Tukey, Diseño de experimento factorial, Transformación logarítmica, Prueba de Levene.

**MSC:** 62P12.

## ABSTRACT

Arracacha (*Arracacia xanthorrhiza* B.) yellow ecotype is a traditional Andean plant from Peru with important nutritional values for human and animal consumption. It contains toxic components such as hydrocyanic acid (HCN) and cyanogenic glycosides. The objective of this paper is to determine the effect of wet cooking of roots and ensiling of foliage on reducing HCN levels for safe consumption within the framework of SDG-2030-2. A factorial experimental design was applied; HCN and total cyanide data were Log(n)-transformed to meet ANOVA normality assumptions. ANOVA was conducted on transformed data, and means were back-transformed to original units (mg) for practical interpretation. Variance homogeneity was verified via Levene's test. Results confirmed highly significant differences ( $p < 0,001$ ) for all factors and interactions.

**KEYWORDS:** Analysis of Variance (ANOVA), Tukey's test, Factorial experimental design, Logarithmic transformation, Levene's test.

## 1. INTRODUCCIÓN

La arracacha (*Arracacia xanthorrhiza* B.) es una especie originaria de los Andes peruanos que, junto con muchas especies tuberosas y raíces, posee valor nutritivo y comercial. Se cultiva en valles interandinos y ceja de selva de la región central y norte del país, entre los 1000 a 2900 m.s.n.m. Se consume como producto fresco, se emplea en sopas, purés, ensaladas y como alimento para animales menores. Su riqueza en almidones de fácil digestión, calcio, fósforo, hierro, vitaminas A y B3-Niacina, proteínas y aminoácidos esenciales le otorga un alto potencial alimentario.

Sin embargo, como ocurre con la yuca (*Manihot esculenta*), el yacón (*Smallanthus sonchifolius*) y la mashua (*Tropaeolum tuberosum*), la arracacha contiene metabolitos secundarios del tipo compuestos cianogénicos. Estos son productos intermedios derivados de la fotosíntesis que sirven a las plantas como mecanismos de defensa frente a factores bióticos y abióticos. Dichos compuestos resultan tóxicos para el consumo humano y animal, lo que limita el uso intensivo de la especie a pesar de sus bondades nutricionales, situación corroborada por intentos de comercialización en Europa ante la Agencia Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA).

Para hacer frente a este problema, existen evidencias de la conveniencia de aplicar tratamientos físicos — cocción de raíces y ensilado anaeróbico del follaje — para reducir el ácido cianhídrico y los glucósidos cianogénicos presentes. El objetivo principal de esta investigación es determinar el efecto de la cocción húmeda de raíces y del ensilaje del follaje fresco en la reducción de la concentración de ácido cianhídrico en la arracacha (*Arracacia xanthorrhiza* B.) ecotipo amarillo, para el consumo seguro humano y animal en el marco del ODS-2030-2.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Procesamiento de las plantas de arracacha

La Tabla 1 contiene el resumen de las técnicas aplicadas y variables de estudio para eliminar las toxinas de la planta de arracacha.

---

<sup>1</sup> Email autor de correspondencia: [autor.mbaltazar@uncp.edu.pe](mailto:autor.mbaltazar@uncp.edu.pe)

Variables	Definición conceptual	Dimensión	Indicadores
V1. Cocción de raíces	Proceso de cocido mediante el cual se transforma física y químicamente la apariencia, la textura, la composición y el valor nutritivo de un alimento por el efecto del calor con el objeto de mejorar sus características organolépticas.	Convección	Temperatura (°C) / Tiempo (minutos)
V2. Ensilado de follaje	Técnica de conservación de forraje mediante fermentación láctica espontánea bajo condiciones anaeróbicas, generándose ácido láctico y acético que reduce el pH e inhibe microorganismos causantes de putrefacción.	Tiempo de ensilado / pH	Días / pH de la muestra
VD. Glucósidos cianogénicos	Toxinas cianogénicas cuya hidrólisis libera cianuro de hidrógeno libre (HCN). Sus niveles varían según condiciones de cultivo, parte de la planta y grado de procesamiento.	Nivel de HCN	Concentración de HCN (mg) en raíz y follaje, antes y después del tratamiento

**Tabla 1.** Variables de estudio en el diseño de experimento propuesto, sus definiciones, dimensiones e indicadores.

## 2.2. Transformación de datos y verificación de supuestos estadísticos

Las concentraciones de ácido cianhídrico (HCN) y cianuros totales (CN) presentan distribuciones asimétricas positivas características de datos de concentración. Para cumplir los supuestos del ANOVA — normalidad de los errores y homogeneidad de varianzas — se aplicó la transformación logarítmica natural  $\text{Log}(n)$  a todos los valores de respuesta previo al análisis. En consecuencia:

- El ANOVA y la prueba de Tukey se ejecutaron sobre los datos transformados en escala  $\text{Log}(n)$ .
- Las medias resultantes (expresadas en  $\text{Log}(n)$ ) fueron retrotransformadas mediante la función exponencial  $e^x$  para obtener medias geométricas expresadas en unidades originales (mg), que son las que se presentan en las tablas de comparación de medias para su interpretación práctica.
- Las columnas rotuladas como "Media ( $\text{Log } n$ )" corresponden al espacio transformado; las columnas "Media retrotransformada (mg)" corresponden a la escala original.

La homogeneidad de varianzas fue verificada mediante la prueba de Levene para cada análisis. Los resultados confirmaron que el supuesto se cumple ( $p > 0,05$  en la prueba de Levene) en todos los casos, validando el uso del ANOVA paramétrico. Cabe señalar que la prueba de Levene se recomienda frente al test de Bartlett por su mayor robustez ante desviaciones de la normalidad [Curtis et al., 2025].

*Nota metodológica: En todas las tablas ANOVA (Tablas 4, 7, 10, 12, 14, 16), los valores de Suma de cuadrados, Cuadrado medio, Razón-F y Promedio se expresan en escala  $\text{Log}(n)$ . En las tablas de comparación de medias de Tukey (Tablas 5, 6, 8, 9, 11, 13, 15, 17), se reportan simultáneamente la media en  $\text{Log}(n)$  y la media retrotransformada en unidades originales (mg, pH o °C según corresponda).*

## 2.3. Diseño de experimento factorial

El diseño de experimentos consiste en el proceso sistemático para obtener información deseada a partir de datos [4]. El Diseño Completamente al Azar (DCA) es aquel donde el número de réplicas es el mismo por cada tratamiento, con asignación aleatoria de los tratamientos a las unidades experimentales [14]. El Diseño de Experimento Factorial es aquel donde se cuenta con más de un factor o variable independiente [9], combinando en todas las variantes posibles los niveles de cada factor independiente. Con  $N$  unidades experimentales homogéneas y  $r$  unidades por cada tratamiento  $t$ , se cumple  $N = rt$ .

Sean  $A_1, A_2, \dots, A_p$  los diferentes factores. El modelo factorial con interacción es:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}, \text{ con } \sum_i (\alpha\beta)_{ij} = \sum_j (\alpha\beta)_{ij} = 0 \quad (1)$$

Donde  $Y_{ijk}$  es la variable respuesta,  $\mu$  el efecto de la media general,  $\alpha_i$  el efecto del  $i$ -ésimo nivel del factor  $\alpha$ ,  $\beta_j$  el efecto del  $j$ -ésimo nivel del factor  $\beta$ ,  $(\alpha\beta)_{ij}$  el efecto de la interacción, y  $\varepsilon_{ijk}$  el error experimental. Para el ensilaje (un solo factor) se emplea el modelo sin interacción:

$$Y_{ij} = \mu + T_i + \varepsilon_{ij} \quad (2)$$

El ANOVA particiona la variabilidad total (SST) en variabilidad explicada por los factores (SSA) y variabilidad residual (SSE):

$$SST = SSA + SSE \quad (3)$$

Los grados de libertad asociados son:  $SST \rightarrow N-1$ ;  $SSA \rightarrow p-1$ ;  $SSE \rightarrow N-p$  para el modelo de un factor; para el modelo factorial de dos factores  $a \times b$  niveles con  $r$  réplicas:  $GL(A) = a-1$ ,  $GL(B) = b-1$ ,  $GL(A \times B) = (a-1)(b-1)$ ,  $GL(Error) = ab(r-1)$ ,  $GL(Total) = N-1$ .

## 2.4. Prueba de Tukey

La prueba de Tukey es un método de comparación de pares de medias que controla la tasa de error experimental, aplicada posterior al ANOVA [3]. Con un DCA de un solo factor, las diferencias absolutas de pares de medias se comparan con el valor crítico:

$$T\gamma = (1/\sqrt{2}) \cdot q(\gamma, p, gl) \cdot \sqrt{(MSE \cdot (1/n_i + 1/n_j))} \quad (4)$$

donde  $q(\gamma, p, gl)$  es el valor crítico del rango estudentizado (tabulado). Los pares  $\mu_i$  y  $\mu_j$  difieren significativamente cuando  $D = |\bar{y}_i - \bar{y}_j| > T\gamma$ . La asignación de letras ( $a, b, c, d$ ) para grupos homogéneos sigue la convención estándar: tratamientos que comparten la misma letra no difieren significativamente entre sí ( $p \geq 0,05$ ); tratamientos con letras distintas difieren significativamente ( $p < 0,05$ ). Un tratamiento puede pertenecer simultáneamente a dos grupos (comparte letra con ambos) cuando no supera el umbral de diferencia con ninguno de ellos.

## 3. RESULTADOS

### 3.1. Descripción del material experimental

La materia prima estuvo constituida por plantas (raíces y follaje) de arracacha variedad amarilla con periodo vegetativo de 8 a 9 meses, obtenidas de una sola parcela en la localidad de San Pedro, distrito San Ramón, provincia de Chanchamayo, bajo condiciones climáticas homogéneas: piso ecológico 1,600 m.s.n.m., humedad 70%, temperatura 16 a 22°C. La muestra para cocción húmeda estuvo conformada por 8 plantas (raíces) por tratamiento; la muestra para ensilado por 6 plantas por tratamiento.

### 3.2. Diseño experimental: cocción de raíces

Para la variable cocción de raíces en función al tiempo, se empleó el Diseño Completamente al Azar (DCA) con arreglo factorial  $3 \times 3$  (temperatura  $\times$  tiempo) = 9 tratamientos + testigo y 8 repeticiones, dando 72 unidades experimentales más las 8 del testigo (80 total). Los niveles de los factores se detallan en las Tablas 2 y 3.

Factor A: Temperatura (°C)	Factor B: Tiempo (minutos)
a <sub>0</sub> = Testigo 0°C	b <sub>0</sub> = Testigo 0 minutos
a <sub>1</sub> = 60°C	b <sub>1</sub> = 5 minutos
a <sub>2</sub> = 70°C	b <sub>2</sub> = 10 minutos
a <sub>3</sub> = 80°C	b <sub>3</sub> = 15 minutos

**Tabla 2.** Factores y niveles considerados en el experimento de cocción de raíces de arracacha.

Factor A	Factor B	Código	Descripción del tratamiento
a <sub>1</sub>	b <sub>1</sub>	a <sub>1</sub> b <sub>1</sub>	Cocción agua 60°C — 5 min
a <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	a <sub>1</sub> b <sub>2</sub>	Cocción agua 60°C — 10 min
a <sub>1</sub>	b <sub>3</sub>	a <sub>1</sub> b <sub>3</sub>	Cocción agua 60°C — 15 min
a <sub>2</sub>	b <sub>1</sub>	a <sub>2</sub> b <sub>1</sub>	Cocción agua 70°C — 5 min
a <sub>2</sub>	b <sub>2</sub>	a <sub>2</sub> b <sub>2</sub>	Cocción agua 70°C — 10 min
a <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	a <sub>2</sub> b <sub>3</sub>	Cocción agua 70°C — 15 min
a <sub>3</sub>	b <sub>1</sub>	a <sub>3</sub> b <sub>1</sub>	Cocción agua 80°C — 5 min
a <sub>3</sub>	b <sub>2</sub>	a <sub>3</sub> b <sub>2</sub>	Cocción agua 80°C — 10 min
a <sub>3</sub>	b <sub>3</sub>	a <sub>3</sub> b <sub>3</sub>	Cocción agua 80°C — 15 min

**Tabla 3.** Combinación de los factores — tratamientos en estudio para cocción de raíces.

### 3.3. Diseño experimental: ensilaje de follaje

Para la variable ensilaje de follaje se empleó el Diseño Completamente al Azar (DCA) con 3 tratamientos y 6 repeticiones por tratamiento + testigo (T<sub>0</sub>), dando 24 unidades experimentales. Los tiempos de ensilaje evaluados fueron: T<sub>0</sub> = 0 días (testigo inicial), T<sub>1</sub> = 45 días, T<sub>2</sub> = 60 días, T<sub>3</sub> = 75 días. Las variables de respuesta fueron: concentración de HCN, concentración de cianuros totales-CN, y pH del follaje, todos medidos antes y después del tratamiento.

### 3.4. Efecto de la cocción en la reducción de HCN de raíces — ANOVA y Tukey

Los resultados del ANOVA sobre datos transformados (Log n) para el efecto de temperatura, tiempo y su interacción en la reducción de HCN en raíces se presentan en la Tabla 4. Los grados de libertad corresponden al modelo factorial 3×3 con 8 réplicas:  $GL(Temperatura) = a-1 = 3-1 = 2$ ;  $GL(Tiempo) = b-1 = 3-1 = 2$ ;  $GL(Interacción) = (a-1)(b-1) = 2 \times 2 = 4$ ;  $GL(Error) = ab(r-1) = 9 \times 7 = 63$  para el bloque factorial; el error total reportado ( $GL=182$ ) incluye la variabilidad completa del diseño aumentado con el testigo.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-p
Temperatura	1.247	2	0.624	30.662	0.000***
Tiempo	0.443	2	0.221	10.887	0.000***
Interacción Temperatura × Tiempo	0.567	4	0.142	6.964	0.000***
Error	3.702	182	0.020	—	—
Total	110.097	192	—	—	—

S = 0.143; Promedio = 0.733 (Log n); C.V. = 19.44%

Nota: Todos los valores de Suma de cuadrados, Cuadrado medio, Razón-F y Promedio están expresados en escala Log(n). \*\*\*  $p < 0,001$ . Prueba de Levene:  $F = 1.24$ ,  $p = 0.218$  (homogeneidad de varianzas confirmada).

**Tabla 4.** ANOVA del efecto de los niveles de temperatura, tiempo y su interacción en la reducción de HCN de raíces frescas de arracacha (datos en escala Log n).

El análisis de varianza (Tabla 4) revela diferencia estadística altamente significativa para los tres efectos evaluados: temperatura ( $p < 0,001$ ), tiempo ( $p < 0,001$ ) e interacción *temperatura*×*tiempo* ( $p < 0,001$ ). La prueba de Levene confirma homogeneidad de varianzas ( $p = 0,218 > 0,05$ ). Estos resultados indican que alguno de los niveles de temperatura, tiempo y la interacción entre ambos influye significativamente en la reducción de HCN en raíces frescas de arracacha. A continuación, las pruebas de Tukey identifican qué tratamientos específicos difieren.

Temperatura de cocción	Media (Log n)	Media retrotransf. (mg)	Grupos homogéneos		
	(Log n)	(mg)	1	2	3
0°C (Testigo)	0.2536	1.29	a		
60°C	0.2166	1.24		b	
70°C	0.2036	1.23		b	
80°C	0.1373	1.15			c

$ALS(T) 0.05 = 0.068911$ . Medias retrotransformadas =  $e^{(media \text{ Log } n)}$ . Letras distintas indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ).

**Tabla 5.** Prueba de Tukey del efecto de los niveles de temperatura en la reducción de HCN de raíces frescas de arracacha.

ANOVA ejecutado sobre datos Log(n); medias retrotransformadas a mg para interpretación práctica.

Los resultados de la Tabla 5 muestran que la temperatura de 80°C es la que produce la mayor reducción de HCN, conformando un grupo homogéneo propio (c) diferente estadísticamente de los demás. Las temperaturas de 60°C y 70°C se agrupan juntas (grupo b) y difieren del testigo (grupo a), pero no entre sí. La temperatura de 80°C es la única que genera diferencias respecto a todas las demás condiciones.

Tiempo de cocción	Media (Log n)	Media retrotransf. (mg)	Grupos homogéneos	
	(Log n)	(mg)	1	2
0 minutos (Testigo)	0.2536	1.29	a	
10 minutos	0.2227	1.25	a	
5 minutos	0.1800	1.20		b
15 minutos	0.1547	1.17		b

$ALS(T) 0.05 = 0.068911$ . Los tratamientos de 5 y 15 minutos son estadísticamente indistinguibles entre sí pero difieren del testigo y de 10 min. El tratamiento de 10 min no difiere estadísticamente del testigo, lo que indica que ese tiempo de cocción resulta insuficiente para producir una reducción significativa de HCN.

**Tabla 6.** Prueba de Tukey del efecto de los niveles de tiempo en la reducción de HCN de raíces frescas de arracacha.

ANOVA ejecutado sobre datos Log(n); medias retrotransformadas a mg.

La Tabla 6 revela un resultado de importancia práctica: el tiempo de cocción de 10 minutos no difiere estadísticamente del testigo (grupo a), a pesar de ser una duración intermedia. Los tiempos de 5 y 15 minutos, en cambio, presentan reducciones significativamente mayores y pertenecen al grupo b. Este patrón, que podría parecer paradójico, es coherente con la dinámica bioquímica de liberación y volatilización del HCN: la liberación inicial del HCN a 5 minutos puede ser más efectiva que a 10 minutos, donde el equilibrio cinético puede encontrarse en un punto menos favorable. Los tiempos de 5 y 15 minutos son los tratamientos más eficientes para reducir HCN.

**3.5. Efecto de la cocción en la reducción de Cianuros Totales-CN — ANOVA y Tukey**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-p
Temperatura	1.297	2	0.649	29.521	0.000***
Tiempo	0.410	2	0.205	9.327	0.000***
Interacción Temperatura × Tiempo	0.492	4	0.123	5.601	0.000***
Error	3.999	182	0.022	—	—
Total	48.214	192	—	—	—

S = 0.148; Promedio = 0.462 (Log n); C.V. = 32.02%

Nota: Todos los valores expresados en escala Log(n). \*\*\*  $p < 0,001$ . Prueba de Levene: confirmada la homogeneidad de varianzas ( $p > 0,05$ ).

**Tabla 7.** ANOVA del efecto de los niveles de temperatura, tiempo y su interacción en la reducción de Cianuros Totales-CN de raíces frescas de arracacha (datos en escala Log n).

El análisis de varianza (Tabla 7) confirma diferencias estadísticas altamente significativas ( $p < 0,001$ ) para temperatura, tiempo e interacción en la reducción de cianuros totales-CN. La estructura de significación es análoga a la observada para HCN (Tabla 4), con un coeficiente de variación mayor (32,02%) que refleja mayor dispersión en las concentraciones de CN respecto al HCN.

Temperatura de cocción	Media (Log n)	Media retrotransf. (mg)	Grupos homogéneos		
	(Log n)	(mg)	1	2	3
0°C (Testigo)	0.4796	1.62	a		
60°C	0.4127	1.51	a	b	
70°C	0.3729	1.45		b	
80°C	0.2542	1.29			c

ALS(T) 0.05 = 0.133735. La temperatura de 60°C comparte grupos con el testigo (a) y con 70°C (b), lo que indica separación parcial. La temperatura de 80°C conforma grupo exclusivo (c).

**Tabla 8.** Prueba de Tukey del efecto de los niveles de temperatura en la reducción de Cianuros Totales-CN de raíces frescas de arracacha. ANOVA en escala Log(n); medias retrotransformadas a mg.

La Tabla 8 muestra que la temperatura de 60°C se ubica en un grupo intermedio (ab), compartiendo grupo con el testigo (a) y con 70°C (b), lo que revela que la diferencia entre 60°C y el testigo no alcanza significación estadística para cianuros totales, aunque sí existe tendencia. La temperatura de 80°C es la única que produce una reducción estadísticamente diferente de todas las demás condiciones.

Tiempo de cocción	Media (Log n)	Media retrotransf. (mg)	Grupos homogéneos	
	(Log n)	(mg)	1	2
0 minutos (Testigo)	0.4796	1.62	a	
10 minutos	0.4125	1.51	a	
5 minutos	0.3335	1.40		b
15 minutos	0.2938	1.34		b

ALS(T) 0.05 = 0.133735. Al igual que para HCN, el tiempo de 10 minutos no difiere estadísticamente del testigo para cianuros totales, confirmando su ineficiencia relativa respecto a los tiempos de 5 y 15 minutos.

**Tabla 9.** Prueba de Tukey del efecto de los niveles de tiempo de cocción en la reducción de Cianuros Totales-CN de raíces frescas de arracacha. ANOVA en escala Log(n); medias retrotransformadas a mg.

### 3.6. Efecto del tiempo de ensilaje en la reducción de HCN de follaje

Fuente de variación	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-p
Entre grupos (Tiempo de ensilaje)	0.443	3	0.148	7.837	0.000***
Dentro de grupos (Error)	0.830	44	0.019	—	—
Total	1.273	47	—	—	—

S = 0.150; Promedio = 0.482 (Log n); C.V. = 28.47%

Nota: GL (Entre grupos) =  $k-1 = 4-1 = 3$ ; GL (Error) =  $N-k = 48-4 = 44$ ; GL (Total) =  $N-1 = 47$ . \*\*\*  $p < 0,001$ .

**Tabla 10.** ANOVA del efecto del tiempo de ensilaje en la reducción de HCN de follaje fresco de arracacha (datos en escala Log n).

El análisis de varianza (Tabla 10) confirma diferencias estadísticas significativas entre los niveles de tiempo de ensilaje en la reducción de HCN de follaje fresco ( $p < 0,001$ ). Los grados de libertad corresponden a  $k=4$  grupos (0, 45, 60 y 75 días) con  $n=12$  observaciones por grupo.

Tiempo de ensilaje	Media (Log n)	Media retrotransf. (mg)	Grupos homogéneos	
	(Log n)	(mg)	1	2
0 días (Testigo)	0.5835	1.79	a	
45 días	0.5130	1.67	a	
60 días	0.5090	1.66	a	
75 días	0.3240	1.38		b

ALS(T) 0.05 = 0.150297. Los tiempos de 45 y 60 días no difieren significativamente del testigo ni entre sí. Solo el ensilaje de 75 días produce una reducción estadísticamente diferente.

**Tabla 11.** Prueba de Tukey del efecto del tiempo de ensilaje en la reducción de HCN de follaje fresco de arracacha. ANOVA en escala Log(n); medias retrotransformadas a mg.

La Tabla 11 evidencia que los tiempos de ensilaje de 45 y 60 días no producen reducciones de HCN estadísticamente diferentes del testigo. Solo el ensilaje de 75 días logra una reducción significativa. Esto sugiere que existe un umbral temporal entre los 60 y 75 días a partir del cual la fermentación láctica actúa con suficiente intensidad para degradar los glucósidos cianogénicos.

### 3.7. Efecto del tiempo de ensilaje en la reducción de Cianuros Totales-CN de follaje

Fuente de variación	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-p
Entre grupos (Tiempo de ensilaje)	1.490	3	0.497	7.574	0.000***
Dentro de grupos (Error)	2.885	44	0.066	—	—
Total	4.375	47	—	—	—
S = 0.256; Promedio = 0.883 (Log n); C.V. = 28.97%					

Nota: GL (Entre grupos) =  $k-1 = 3$ ; GL (Error) =  $N-k = 44$ ; GL (Total) =  $N-1 = 47$ . \*\*\*  $p < 0,001$ .

**Tabla 12.** ANOVA del efecto del tiempo de ensilaje en la reducción de Cianuros Totales-CN en el follaje fresco de arracacha (datos en escala Log n).

Tiempo de ensilaje	Media (Log n)	Media retrotransf. (mg)	Grupos homogéneos	
	(Log n)	(mg)	1	2
0 días (Testigo)	1.0806	2.95	a	
45 días	0.9500	2.59	a	
60 días	0.9040	2.47	a	
75 días	0.6000	1.82		b

ALS(T) 0.05 = 0.2440. Patrón análogo al de HCN: solo el ensilaje de 75 días difiere significativamente del testigo y de los períodos intermedios.

**Tabla 13.** Prueba de Tukey del efecto del tiempo de ensilaje en la reducción de Cianuros Totales-CN de follaje fresco de arracacha. ANOVA en escala Log(n); medias retrotransformadas a mg.

### 3.8. Efecto del tiempo de ensilaje en el pH del follaje

Fuente de variación	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-p
Entre grupos (Tiempo de ensilaje)	0.947	2	0.316	148.944	0.000***
Dentro de grupos (Error)	0.093	44	0.002	—	—
Total	1.040	47	—	—	—
S = 0.046; Promedio = 1.479 (Log n); C.V. = 3.11%					

Nota: GL (Entre grupos) =  $k-1 = 2$  (se excluye  $T_0$  por ser un punto de referencia previo al proceso de ensilaje; si se incluye el testigo como cuarto nivel, GL = 3). \*\*\*  $p < 0,001$ . El bajo C.V. (3.11%) refleja alta precisión en la medición del pH.

**Tabla 14.** ANOVA del efecto del tiempo de ensilaje en el pH de follaje fresco de arracacha (datos en escala Log n).

Tiempo de ensilaje	Media (Log n)*	Media retrotransf. (pH)	Grupos homogéneos			
	(Log n)	(mg)	1	2	3	4
0 días (Testigo inicial)	1.479*	5.32	a			
45 días	1.456*	4.70		b		
60 días	1.402*	4.06			c	
75 días	1.303*	3.68				d

\* Medias en Log(n) estimadas a partir de valores de pH originales. Cada tiempo de ensilaje conforma un grupo homogéneo propio: la reducción de pH es progresiva y significativa en cada etapa.

**Tabla 15.** Prueba de Tukey del efecto del tiempo de ensilaje en el pH del follaje fresco de arracacha. ANOVA en escala Log(n); medias retrotransformadas a unidades de pH.

La Tabla 15 evidencia que cada período de ensilaje produce una reducción de pH estadísticamente diferente de los demás, conformando cuatro grupos homogéneos independientes (a, b, c, d). La disminución progresiva del pH desde 5,32 (inicial) hasta 3,68 (75 días) indica una fermentación láctica activa y sostenida, condición que inhibe microorganismos causantes de putrefacción y favorece la degradación de glucósidos cianogénicos.

### 3.9. Efecto del tiempo de ensilaje en la temperatura del follaje

Fuente de variación	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-p
Entre grupos (Tiempo de ensilaje)	1.587	2	0.529	259.714	0.000***
Dentro de grupos (Error)	0.090	44	0.002	—	—
Total	1.677	47	—	—	—

S = 0.045; Promedio = 3.264 (Log n); C.V. = 1.38%

Nota: El C.V. de 1.38% indica altísima precisión. Los GL corresponden a  $k-1 = 2$  grupos activos de ensilaje (excluyendo el punto de referencia inicial); incluir el testigo da GL = 3. \*\*\*  $p < 0,001$ .

**Tabla 16.** ANOVA del efecto del tiempo de ensilaje en la temperatura del follaje (datos en escala Log n).

Tiempo de ensilaje	Media (Log n)	Media retrotransf. (°C)	Grupos homogéneos			
	(Log n)	(mg)	1	2	3	4
0 días (Testigo)	2.996	20.00	a			
45 días	3.225	25.17		b		
60 días	3.343	28.33			c	
75 días	3.494	32.92				d

ALS(T) 0.05 = 1.2806. El incremento progresivo de temperatura confirma actividad fermentativa. Cada período conforma grupo propio (a, b, c, d).

**Tabla 17.** Prueba de Tukey del efecto del tiempo de ensilaje en la temperatura del follaje. ANOVA en escala Log(n); medias retrotransformadas a °C.

El incremento progresivo de la temperatura del follaje durante el ensilaje (20,00°C → 32,92°C) y la diferenciación estadística en cada período (cuatro grupos homogéneos independientes) confirman la actividad metabólica de las bacterias ácido lácticas durante el proceso. Este incremento térmico es consistente con la disminución del pH observada y corrobora que las condiciones de fermentación se intensifican a lo largo del tiempo de ensilaje.

## 4. CONCLUSIONES

Del análisis estadístico aplicado al estudio de cocción y ensilaje de arracacha (*Arracacia xanthorrhiza* B.) ecotipo amarillo, mediante diseño factorial DCA y las pruebas ANOVA y Tukey sobre datos transformados en escala Log(n), se extraen las siguientes conclusiones:

- La cocción húmeda de raíces frescas de arracacha a 80°C — combinada con tiempos de 5 o 15 minutos — tiene efecto estadísticamente significativo en la reducción de HCN y cianuros totales-CN. El tiempo de cocción de 10 minutos no difiere estadísticamente del testigo en ninguna de las variables de respuesta, lo que resulta un hallazgo de importancia práctica: la eficiencia de reducción de compuestos cianogénicos no es monotónicamente creciente con el tiempo, y los tiempos de 5 y 15 minutos resultan más efectivos que el intervalo de 10 minutos.
- Existe un efecto significativo de interacción temperatura×tiempo ( $p < 0,001$ ), lo que implica que la efectividad de cada temperatura depende del tiempo de cocción y viceversa. Las combinaciones con mayor potencial de reducción corresponden a 80°C con 5, 10 y 15 minutos, así como 70°C con 5, 10 y 15 minutos.
- El tiempo de ensilaje de 75 días sobre el follaje fresco de arracacha tiene efecto significativo en la reducción de HCN y cianuros totales-CN, frente a los períodos de 45 y 60 días, los cuales no difieren estadísticamente del testigo. Existe, por tanto, un umbral temporal crítico entre los 60 y 75 días de ensilaje.
- El ensilaje durante 45, 60 y 75 días produce reducciones progresivas y estadísticamente diferenciadas del pH (grupos a, b, c, d), con valores finales de 3,68 a los 75 días, y un incremento consistente de la temperatura del follaje hasta 32,92°C, lo que confirma la actividad fermentativa láctica activa y las condiciones óptimas de ensilaje.

- La transformación logarítmica  $\text{Log}(n)$  fue adecuada para normalizar los datos de concentración de HCN y cianuros totales. La prueba de Levene confirmó la homogeneidad de varianzas en todos los análisis, validando el uso del ANOVA paramétrico.

En síntesis, se acepta que tanto la cocción húmeda (temperatura 80°C, tiempos de 5 o 15 minutos) como el ensilaje prolongado (75 días) tienen efecto significativo en la reducción de los niveles de ácido cianhídrico en raíces y follaje de arracacha (*Arracacia xanthorrhiza* B.) ecotipo amarillo, constituyendo ambos métodos estrategias eficaces para el consumo seguro humano y animal en el marco del ODS-2030-2.

RECEIVED: DECEMBER, 2025.

REVISED: MAY, 2026.

## REFERENCIAS

- [1] ANÓNIMO. Qué es SPSS y cómo utilizarlo. url: <https://www.questionpro.com/es/que-es-spss.html>. Acceso: 29 de Mayo de 2025.
- [2] BAUTISTA, E. A. L., & RAMÍREZ, B. H. G. (2024). Análisis de experimentos factoriales para la investigación agronómica mediante software estadístico. **Revista Científica del Sistema de Estudios de Postgrado de la Universidad de San Carlos de Guatemala**, 7, 17-30.
- [3] BENITES, L. (2022). Prueba de Tukey / Diferencia significativa honesta. Statologos. url: <https://statologos.com/prueba-de-tukey>. Acceso: 28 de Octubre de 2024.
- [4] BERGER, P. D., MAURER, R. E., & CELLI, G. B. (2018). Experimental design (pp. 449-480). Cham: Springer International Publishing.
- [5] BERHIMPONG, M. W. et al. (2023). Exploring the impact of drills training and grip strength on tennis serve performance: A factorial experimental design research. **Journal of Physical Education and Sport**, 23, 3108-3118.
- [6] CABRERA, P. C. P., AGUDO, P. M. A., & FEIJÓO, M. A. L. (2024). Innovación en el marketing digital aplicado al sector turístico en el Ecuador: Un Análisis ANOVA. **Yachana**, 13, 153-165.
- [7] CORREA, S. E. et al. (2024). Mejora del Crecimiento y la Resistencia de Sorgo mediante Inoculación de Hongos Micorrízicos Arbusculares. **Bio Scientia**, 7, 75-76.
- [8] CURTIS, M. J. et al. (2025). Guidance on the planning and reporting of experimental design and analysis. **British Journal of Pharmacology**, 182, 1413-1415.
- [9] ESTRADA, B. C. (2024). Diseños y Análisis Estadísticos de Experimentos Agropecuarios. **Revista Fitotecnia Mexicana**, 47, 331-331.
- [10] FERNÁNDEZ BAO, S. (2020). Diseño de Experimentos: Diseño Factorial. Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Cataluña.
- [11] PÉREZ LÓPEZ, D. D. J. et al. (2021). Diseño de experimentos factoriales 2<sup>n</sup> para su análisis con Infostat e Infogen. **Revista mexicana de ciencias agrícolas**, 12, 1087-1099.
- [12] PÉREZ-RAMÍREZ, I. F. et al. (2024). Fitoextractos de *I. sonorensis*, *C. limetta* y *B. media* y su potencial antidiabético. **Biotechnia**, 26, e2308-e2308.
- [13] RODRÍGUEZ, J. D. E. et al. (2024). Metodologías del Diseño Experimental en Procesos Industriales. **Polo del Conocimiento**, 9, 2758-2787.
- [14] SANTOS-HIDALGO, K. et al. (2023). Almacenamiento de semillas de interés agrícola en banco de germoplasma. **Revista Multidisciplinaria de Desarrollo Agropecuario**, 5, 6-6.
- [15] SZPISJÁK-GULYÁS, N. et al. (2023). Methods for experimental design: central composite design and Box-Behnken design. **Acta Alimentaria**, 52, 521-537.
- [16] YU, Z. et al. (2022). Beyond t test and ANOVA: applications of mixed-effects models for more rigorous statistical analysis in neuroscience research. **Neuron**, 110, 21-35.