



EFFECTOS DE LAS FUENTES NITROGENADAS EN LA MORFOFISIOLOGÍA, PRODUCCIÓN Y CALIDAD DE CACAO (*Theobroma cacao* L.) CCN-51 EN EL SUR DE LA AMAZONIA ECUATORIANA †

[NITROGEN SOURCES EFFECTS ON THE MORPHOPHYSIOLOGY, PRODUCTION AND QUALITY OF COCOA (*Theobroma cacao* L.) CCN-51 IN THE SOUTHERN ECUADORIAN AMAZON]

Mirian Capa-Morocho*¹, Adriana Romero-Maza¹, Melissa Romero², Marlene Molina-Müller¹, Santiago C. Vásquez¹ and Fernando Granja¹

¹*Carrera de Ingeniería Agronómica, Facultad Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables, Universidad Nacional de Loja, Avenida Pio Jaramillo Alvarado, C.P. 110103, Loja, Ecuador. Email: mirian.capa@unl.edu.ec*

²*Universidade Federal do Tocantins, Rua Badejos, Chácara 69-72, lote 07, C.P.: 77410-530, Gurupi, Tocantins, Brasil. Email: melissa.romero@mail.uft.edu.br*

*Corresponding author

SUMMARY

Background. In the new global economy, cocoa is an important crop. However, far too little attention has been paid to the nutritional aspects. On the other hand, nitrogen is the most important nutrient in crop production, and mineral nitrogen fertilizers are the most widely used by farmers. Improving the efficiency of nitrogen uptake and utilization could potentially increase crop yields and quality, as well as reduce nitrogen fertilization and environmental pollution. **Objective.** Therefore, the objective of this study was to evaluate the effect of three nitrogen sources on morphological characteristics, yield and quality of CCN-51 cocoa, and soil chemical characteristics in the Ecuadorian Amazon. **Methodology.** A randomized design was established with 4 treatments with the same N dose, but varying the source (amide: urea, calcium nitrate, NC, and ammonium sulfate, SA), plus a control without N application. The investigated variables are soil chemical characteristics, shoot growth, fruit morphology, seed chemical characteristics, production and yield estimates, and agronomic efficiency of the sources. **Results.** NC maintained soil pH at 5.29 points compared to SA and urea, which acidified at a higher rate (4.32 and 3.96), leading to an increase of N and a decrease Ca in the soil. SA increased the fat content in the cocoa seed (54.1 %), with a higher number of fruits per plant (16.7) and, therefore, a better yield (0.799 t/ha). **Implications.** These results provide basic information on the nitrogen source effects and cocoa nutrition to be considered for future research. **Conclusion.** The findings suggested that NC conserves soil pH better than the other sources. SA increases production and fat content, so it can be considered the most efficient.

Key words: Ammonium sulfate; calcium nitrate; urea; yield.

RESUMEN

Antecedentes. El cacao constituye un rubro importante en la economía mundial con grandes vacíos aún en aspectos de nutrición. El nitrógeno es el nutriente más importante en la producción de cultivos y los fertilizantes nitrogenados minerales los más utilizados por los agricultores. Mejorar la eficiencia de absorción y utilización del nitrógeno podría aumentar potencialmente el rendimiento y calidad de los cultivos, así como reducir la fertilización nitrogenada y la contaminación ambiental. **Objetivo.** Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de tres fuentes nitrogenadas sobre características morfológicas, productivas y de calidad de cacao CCN-51, y su efecto en las características químicas del suelo en la Amazonía ecuatoriana. **Metodología.** Se estableció un diseño completamente al azar con 4 tratamientos con una misma dosis de N, pero variando la fuente (amida: urea, nitrato de calcio, NC y sulfato de amonio, SA), más un control sin aplicación de N. Se evaluaron características químicas del suelo, crecimiento de brotes, morfología de frutos, características químicas de la semilla, estimaciones de producción y rendimiento y eficiencia agronómica de las fuentes. **Resultados.** El NC mantuvo el pH del suelo en 5.29 puntos en comparación al SA y la urea que acidificaron en mayor proporción (4.32 y 3.96), trayendo consigo un incremento de N y disminución de Ca en el suelo. Además, el uso de SA elevó el contenido de grasa en la semilla de cacao (54.1 %), contando también con un mayor número de frutos por planta (16.7) y por ende mejor rendimiento (0.799 t/ha). **Implicaciones.** Los resultados proveen información básica sobre el efecto de las fuentes nitrogenadas y la nutrición del cacao a considerar para futuras investigaciones. **Conclusión.** Se sugiere que, aunque el NC conserve mejor el pH del suelo, el SA incrementa la producción y contenido de grasa en la semilla, considerándolo más eficiente que las demás fuentes.

Palabras clave: Sulfato de amonio; nitrato de calcio; urea; rendimiento.

† Submitted April 5, 2022 – Accepted July 19, 2022. <http://doi.org/10.56369/tsaes.4316>



INTRODUCCIÓN

El cacao constituye un rubro importante en la economía mundial, utilizado para la producción de alimentos, bebidas y otros productos (FAO, 2020). La demanda de cacao se incrementa, previendo un déficit, razón por la cual, resulta importante optimizar los recursos y técnicas para incrementar la productividad del cultivo (Jerez, 2017). Se espera que el mercado mundial de granos de cacao crezca a una tasa de crecimiento anual compuesta del 7.3% entre 2019 y 2025 para llegar a 16320 millones de dólares (Voora *et al.*, 2019).

Ecuador ocupa el tercer lugar en exportación de cacao después de Costa de Marfil y Ghana (García-Briones *et al.*, 2021, FAOSTAT, 2022), sin embargo, su rendimiento es bajo con promedios nacionales de 0.62 t/ha (SIPA, 2021). En la producción de cacao intervienen varios factores y condiciones. Un aspecto importante a considerar es la interacción de los factores ambientales. La Amazonía ecuatoriana se caracteriza por abundantes precipitaciones y altas temperaturas durante todo el año (Espinoza *et al.*, 2009, Portilla, 2018, Ilbay-Yupa *et al.*, 2021). Sin embargo, el impacto que estos tengan sobre el crecimiento y productividad del cultivo también depende de la genética, misma que determina sus características morfológicas y fisiológicas (Müller, 1992, Cuenca-Cuenca *et al.*, 2019). La variedad CCN-51 registra mayor productividad, con un inicio más temprano de producción, mayor resistencia a ciertas enfermedades y alto contenido en grasa en semillas, en comparación al cacao fino de aroma (Amores *et al.*, 2011). Además, esta variedad presenta mayor capacidad para el uso eficiente de los nutrientes (Cuenca-Cuenca *et al.*, 2019), y adaptabilidad a un gran número de regiones y entornos ecogeográficos (Jaimez *et al.*, 2022).

El nitrógeno constituye uno de los macronutrientes más importantes para el desarrollo de las plantas encontrándose en el suelo en diferentes formas (Van Vliet *et al.*, 2015). El NH_4^+ y el NO_3^- son las principales formas inorgánicas de N en los suelos que pueden ser absorbidas por las plantas. La elección de nitrato o amonio varía en función de la especie y su absorción depende de las condiciones de aplicación de N y del suelo (Ma *et al.*, 2015).

Los fertilizantes nitrogenados tienen una importante influencia sobre el pH del suelo, la cual depende principalmente del perfil acidificante de la composición química del fertilizante, de su carácter descalcificante o calcificante y de la capacidad tamponadora del suelo. Se ha reportado que la acidificación del suelo es favorecida mediante la aplicación de fertilizantes que contienen amonio (NH_4^+) (Baldoncini, 2015). Cuando se suministra un fertilizante nitrogenado en fuente amoniacal, este es convertido a nitrato (NO_3^-) en el suelo a través del proceso conocido como nitrificación. La forma

amoniacal pasa a forma nítrica liberando H^+ al medio y esta última queda como NO_3^- (Mariscal-Sancho and Ginés, 2002).

A pesar de la creciente evidencia sobre el aumento de la eficiencia del uso del nitrógeno, a través del manejo del cultivo, como el momento y cantidad correcta de aplicación del fertilizante (Olson and Swallow, 1984, Wuest and Cassman, 1992, Morais, 1998, Romero-Lozada *et al.*, 2016, Rosas-Patiño *et al.*, 2017 y 2019), pocas investigaciones se han realizado para examinar si la fuente nitrogenada mineral puede mejorar el rendimiento y calidad de los cultivos, así como mejorar los ingresos de los productores y mitigar la contaminación ambiental, especialmente en ecosistemas amazónicos. Algunos trabajos indican que existe influencia significativa en el crecimiento y producción de acuerdo a la fuente nitrogenada aplicada a los cultivos de maíz, papa, arroz, trigo, verdolaga entre otros (DeAndrade, *et al.*, 2009, Kaymak, 2013, Pineda-Taco *et al.*, 2020, Yan *et al.*, 2020, Alsam *et al.*, 2021). Granja and Covarrubias (2018), reportan disminuciones de pH a nivel del suelo e incremento de clorofila en aguacate cultivado en suelos calcáreos al aplicar sulfato de amonio en comparación con urea y nitrato de calcio. Las diferentes fuentes de N también modificaron la concentración de N-NO_3^- , N-NH_4^+ y N total en las hojas. En otro estudio Gardiazabal *et al.*, (2007) probó dosis iguales en cultivo de aguacate con fuente urea y sulfato de amonio más un inhibidor de nitrificación, lo que provocó un excesivo crecimiento vegetativo para la última fuente causando una reducción del rendimiento las temporadas siguientes. Molina and Covarrubias (2019) ante diferentes fuentes de N tratadas en patrones de uva en medio alcalino, encontraron que la presencia de NH_4^+ promovió un aumento del verdor de las hojas, y las plantas tratadas no desencadenaron mecanismos de respuesta fisiológica a las deficiencias nutricionales en las raíces. Sin embargo, el NH_4^+ disminuyó la concentración de K en las hojas.

Al referirnos al cultivo de cacao, la información de eficiencia de distintos fertilizantes es ambigua y contradictoria, y más aún bajo condiciones de la Amazonía ecuatoriana, no se tiene claro la cantidad de nutrientes que se añade con los fertilizantes, formas de aplicación o criterios básicos sobre estado inicial del suelo (Van Vliet *et al.*, 2015). Además, las concentraciones de N mineral en el suelo pueden fluctuar rápidamente, debido a los cambios que puede sufrir dependiendo de las condiciones que se presenten. Ningún otro elemento esencial para la vida adopta tantas formas en el suelo como el nitrógeno, el cual puede adoptar nueve formas químicas diferentes que corresponden a distintos estados oxidativos los cuales son mediados principalmente por microorganismos y dentro del ciclo del nitrógeno pueden ocurrir proceso de fijación, nitrificación, desnitrificación, volatilización, entre otros (Robertson and Groffman,

2007), lo que dificulta la derivación de una prueba de suelo para indicar la deficiencia de N. Al momento no se conoce la fuente mineral más efectiva para elevar la producción, es por esto que este trabajo tiene por objetivo determinar el efecto de diferentes fuentes nitrogenadas sobre la morfofisiología, producción y calidad del cacao, y su influencia en las características químicas del suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El presente estudio se desarrolló en 2018 y 2019 en el barrio Piuntza, parroquia Guadalupe, provincia de Zamora Chinchipe ubicado al Sur de la Amazonía ecuatoriana (Figura 1). El área experimental se ubica a una latitud de 3.85° de latitud sur, 78.75° de longitud oeste y una altitud de 849 msnm. El clima de la región es Af, cálido y lluvioso todo el año, con temperatura media de 24.5 °C, precipitación media de 1948 mm anuales y una humedad relativa del 80 % (Rubel and Kottek, 2010). El suelo del sitio experimental tiene las siguientes características: textura franco arcillosa, pH 4.7 y 4% de materia orgánica (Tabla 1).

Diseño experimental y tratamientos

Se evaluaron plantas de cacao clon CCN-51 de 5 años de edad, sembradas a una densidad de 816 plantas/ha (3.5 x 3.5 m). Los individuos para la investigación se seleccionaron según su homogeneidad en altura, número de ramas

principales, vigor y estado fenológico de acuerdo a la escala BBCH 51 (prefloración) (Niemenak *et al.*, 2010). La investigación se desarrolló con un diseño completamente al azar con 4 tratamientos y 10

Tabla 1. Parámetros químicos del suelo antes de la fertilización base y la aplicación de los tratamientos.

Parámetro	Unidad de medida	Cantidad
Materia orgánica (MO)	%	4.00
pH		4.70
Nitrógeno (amonio)	ppm	47.00
Fósforo (P)	ppm	22.00
Potasio (K)	meq/100ml	0.371
Calcio (Ca)	meq/100ml	2.47
Magnesio (Mg)	meq/100ml	1.62
Azufre (S)	ppm	16.00
Zinc (Zn)	ppm	4.10
Cobre (Cu)	ppm	6.50
Hierro (Fe)	ppm	711.00
Manganeso (Mn)	ppm	34.00
Boro (B)	ppm	0.50
Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	meq/100g	112.00
Σ Bases		4.45
Ca/Mg		1.54
Mg/K		4.32
(Ca+Mg)/K		10.96

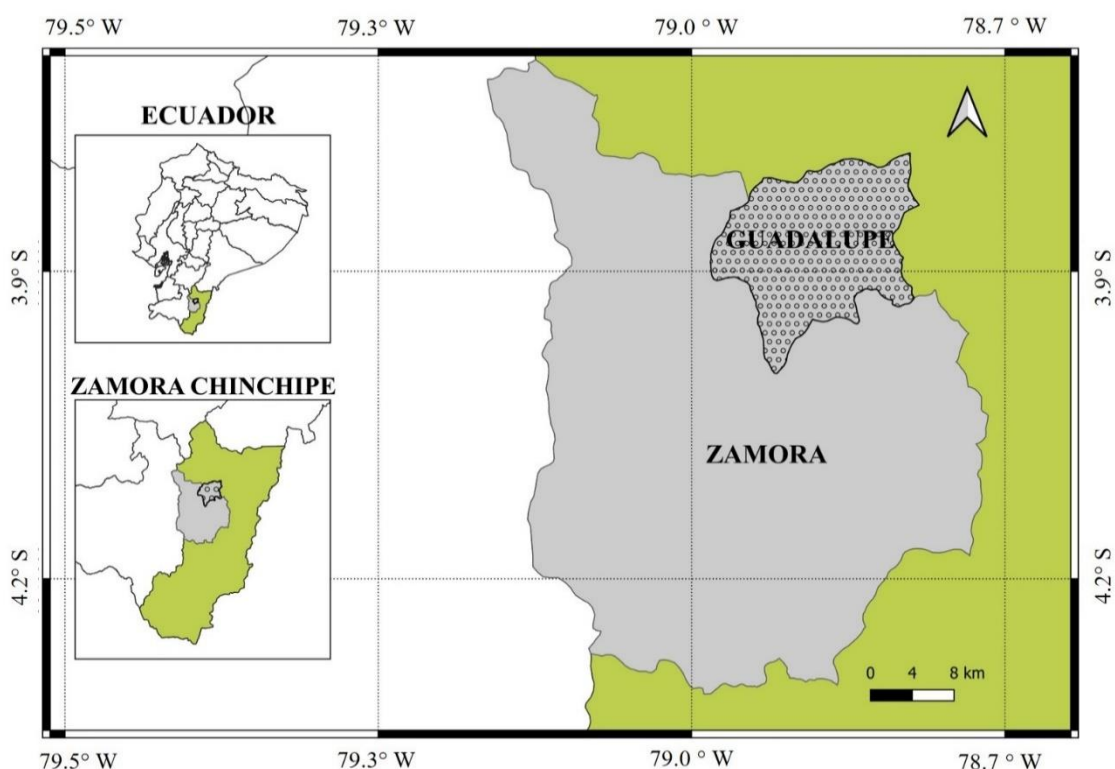


Figura 1. Ubicación del experimento en la provincia de Zamora Chinchipe, Ecuador.

repeticiones. Se consideró a un árbol de cacao como unidad experimental. Los tratamientos evaluados fueron un testigo y 3 fuentes de nitrógeno: T1 testigo sin nitrógeno, T2 fertilización con 340 g/planta de urea, T3 fertilización con 1010 g/planta de nitrato de calcio y T4 fertilización con 744 g/planta de sulfato de amonio, fraccionado mensualmente. Todos los tratamientos tienen una misma dosis de nitrógeno de 156.4 g N/planta que equivale a 128 kg de N/ha. La dosis se determinó en base a la tabla de extracción de elementos considerando el rendimiento (Furcal-Beriguete, 2017) y el análisis de suelo (Tabla 1). Los tratamientos fueron aplicados por unidad experimental mensualmente en 4 zonas ubicadas en los puntos cardinales a la altura de las raíces superficiales.

Previo a la aplicación de los tratamientos se realizó una corrección de pH mediante encalado con una dosis de 1 kg/planta, elevando el pH a 6.69 y una fertilización de corrección basada en un análisis inicial de suelo a todas las unidades experimentales evitando de esta manera posibles efectos del ion acompañante de las fuentes de nitrógeno suministradas.

VARIABLES ANALIZADAS

VARIABLES MORFOLÓGICAS DE BROTES, FRUTOS Y SEMILLAS

En cada unidad experimental se seleccionaron 4 brotes homogéneos en etapa inicial de crecimiento ubicados en el tercio medio del dosel orientados en los puntos cardinales. De los brotes se evaluó la longitud y su tasa de crecimiento absoluta (TCA), número y longitud de metámeros. Para el cálculo de la TCA se usó la ecuación: $TCA = \frac{Lt_1 - Lt_0}{t_1 - t_0}$, donde Lt_1 y Lt_0 son la variación de longitud del brote medida en la fecha actual (t_1) y anterior (t_0) al muestreo (Bastías *et al.*, 2014). Además, se calculó el área foliar del brote mediante una ecuación de regresión determinada a partir del ancho de la hoja ($R^2 = 0.952$) de acuerdo a Kumar (2009) y Herrera *et al.*, (2022). La ecuación utilizada es la siguiente: $AF = 1.9944 * x^{2.0698}$; donde AF= área foliar y x= ancho de la hoja. Los parámetros morfológicos se evaluaron durante el periodo de crecimiento estacional (10 meses).

En la etapa de madurez fisiológica, se determinó el número total de frutos por árbol, y se seleccionaron 3 frutos en todas las repeticiones para evaluar longitud y peso fresco promedio.

Realizada la cosecha, se determinó en el laboratorio el peso fresco de la semilla (almendras). Las muestras se sometieron a 65°C en una estufa por dos días para proceder a calcular el tamaño de las semillas secas, pesos secos mediante el promedio de 30 semillas por tratamiento.

Para determinar el índice de mazorca, se contó todos los frutos requeridos para obtener 1 kg de semilla seca de acuerdo a Graziani *et al.*, (2002).

PRODUCCIÓN Y RENDIMIENTO

La producción promedio se determinó multiplicando el número de frutos por planta por el peso promedio fresco de los frutos. Mientras que, el rendimiento por hectárea se calculó mediante el producto del peso promedio de la semilla seca, el número de semillas por fruto, el número de frutos por planta y la densidad de siembra durante la etapa productiva del cultivo, que fue de 3 meses.

La eficiencia agronómica de los frutos, la cantidad de semillas secas producidos por cada kg de fertilizante utilizado, se calculó mediante la siguiente fórmula: $EA = \frac{R(f) - R(T)}{NAF}$, donde: R (f) = rendimiento de semilla del tratamiento evaluado; R (T) = rendimiento de semilla del Testigo absoluto; NAF = cantidad de nutriente aplicado con el fertilizante (Ghulam *et al.*, 1996, Puentes-Páramo *et al.*, 2014).

ANÁLISIS QUÍMICO DE LAS SEMILLAS

En las semillas de cacao se realizaron determinaciones de nitrógeno, grasas totales y ceniza considerando el manual de métodos analíticos publicado por la AOAC (2016). Para el nitrógeno total se utilizó Kjeldahl siguiendo el método 2001.11. Para grasas totales se utilizó Soxhlet siguiendo el método 948.22; mientras que, para ceniza se realizó por incineración en mufla siguiendo el método 923.03.

ANÁLISIS QUÍMICO DEL SUELO

Se determinó el pH mediante un potenciómetro a partir de 30 g de suelo proveniente de las zonas de fertilización por unidad experimental, considerando 5 repeticiones por tratamiento. Además, al final del estudio se determinó los contenidos de nitrógeno inorgánico, fósforo, potasio, calcio y magnesio del suelo en el laboratorio de Manejo de Suelos y Agua de la Estación Experimental de Santa Catalina perteneciente al Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias del Ecuador (INIAP). La metodología usada para la determinar el nitrógeno amoniacal fue fotocolorimétrico-azul indofenol en extracto Olsen modificado pH 8.5; el fósforo se determinó mediante fotocolorimétrico-Azul de fosfomolibdato en extracto Olsen modificado pH 8.5; mientras que, para determinar K, Ca y Mg se realizó con espectrofotometría de absorción atómica en extracto Olsen modificado pH 8.5 (INIAP, 2002).

Análisis estadísticos

Las variables longitud del brote, tasa de crecimiento absoluta (TCA) y pH del suelo se analizó a través de un modelo de medidas repetidas, utilizando MIXED del SAS (SAS, 2021). En el modelo el tratamiento fue la variable fija y la unidad experimental la variable aleatoria. Además, en el modelo se empleó una matriz de varianzas y covarianza de tipo autoregresivo heterogéneo de orden uno. Para analizar los resultados de características morfológicas del brote, fruto y semillas, producción y rendimiento, contenidos químicos de la semilla y del suelo se realizó un análisis de varianzas a través del procedimiento GLM de SAS. Las medias se compararon a través del test de Tukey con el 95 % de confianza con la que se determinó diferencias significativas entre cada tratamiento.

RESULTADOS

Variabes morfológicas

Brotos

La aplicación de nitrógeno en diferentes fuentes nitrogenadas no afectó significativamente a los parámetros morfológicos de brotes, frutos y semillas de CCN-51 bajo condiciones de la Amazonía ecuatoriana. En este estudio, se encontró que no

existe diferencias en el crecimiento de los brotes y tasa de crecimiento absoluta (TCA) (Tabla 2). El crecimiento de los brotes disminuye progresivamente desde los 151 días de iniciado los tratamientos hasta los 240 días alcanzado mínimos de crecimiento de 0.02 cm/día. La longitud promedio alcanzada por los brotes fue de 34 cm. Los valores mayores para TCA y longitud de los brotes fueron obtenidos con el uso de sulfato de amonio.

Tampoco se observó efectos en las características morfológicas de los brotes como el número ($P = 0.279$) y longitud de metámeros ($P = 0.411$) y área foliar ($P = 0.2516$; Tabla 3). Al final del ensayo, los brotes presentaron entre 10 y 12 metámeros, con una longitud promedio de 2.5 cm y 1230 cm² de área foliar.

Frutos y semillas

En cuanto a los frutos, el peso fresco, longitud de frutos, número de semillas por fruto y peso de semillas no se evidenció diferencias significativas entre el testigo y la aplicación de nitrógeno (Tabla 3). Se encontró que el cacao CCN-51, bajo las condiciones de la amazonia ecuatoriana poseen en promedio 32 semillas por fruto con un peso seco de semillas de 53 gramos, siendo el promedio de peso fresco por fruto de 561 gramos y 23 cm de longitud.

Tabla 2. Crecimiento de brotes de cacao CCN-51 (cm) y tasa de crecimiento absoluto (cm/día) con diferentes fuentes nitrogenadas en diferentes días después de aplicación del tratamiento (DDT).

Variable	Tratamiento				EEM	P-valor	
	DDT	Testigo	Urea	Nitrato de calcio			Sulfato de amonio
32		6.41	6.50	6.15	6.81	0.527	0.855
60		11.2	10.9	9.50	11.4	1.105	0.651
88		12.9	12.7	12.0	13.1	1.382	0.952
114		17.9	18.9	16.7	18.3	2.712	0.954
151		22.8	21.6	25.9	26.1	2.525	0.502
177		24.2	25.7	28.0	27.5	2.262	0.616
212		24.3	26.7	29.4	27.0	2.553	0.580
240		26.2	27.5	29.7	31.2	2.710	0.594
275		27.8	28.2	30.5	37.2	3.205	0.183
296		30.8	30.3	33.1	41.6	3.341	0.093
<i>Tasa de crecimiento absoluto (cm/día)</i>							
60		0.172	0.157	0.134	0.163	0.022	0.687
88		0.116	0.111	0.110	0.112	0.015	0.994
114		0.141	0.151	0.148	0.140	0.140	0.984
151		0.186	0.072	0.268	0.203	0.186	0.132
177		0.054	0.158	0.083	0.047	0.054	0.114
212		0.003	0.029	0.038	0.000	0.029	0.776
240		0.068	0.028	0.014	0.148	0.014	0.077
275		0.044	0.021	0.022	0.171	0.021	0.111
296		0.146	0.098	0.126	0.208	0.126	0.791

Tabla 3. Efecto de diferentes fuentes nitrogenadas sobre características morfológicas de brote, fruto y semillas, y, producción de cacao CCN-51 en la parroquia Guadalupe, Zamora Chinchipe.

Variable	Tratamiento				EEM	P-valor
	Testigo	Urea	Nitrato de calcio	Sulfato de amonio		
<i>Brote</i>						
Número de metámeros	10.6	10.0	12.6	13.2	1.309	0.279
Longitud de metámeros (cm)	2.63	2.74	2.27	2.34	0.222	0.411
Área foliar (cm ²)	1367	901	1314	1337	249.3	0.516
<i>Frutos</i>						
Peso fresco (g)	566	565	539	576	44.04	0.957
Longitud (cm)	24.1	22.5	23.2	23.3	0.921	0.738
Número de semillas por fruto	33.9	31.4	30.7	32.8	3.753	0.946
Peso semillas/fruto (g)	58.8	49.0	49.5	55.8	6.928	0.746
<i>Semilla</i>						
Peso seco (g/semilla)	1.83	1.88	1.97	1.83	0.096	0.728
Longitud (mm)	22.3	22.9	23.1	22.9	0.666	0.819
Ancho (mm)	13.3	13.7	14.1	13.3	0.317	0.297
Índice de mazorca (frutos/kg semilla seca)	19.4	22.3	24.2	17.5	2.988	0.643
<i>Variables productivas</i>						
Números de frutos (frutos/árbol)	10.7 ^c	12.3 ^{bc}	13.3 ^b	16.7 ^a	0.667	0.001
Producción en fresco (kg/planta)	6.02 ^b	6.97 ^b	7.18 ^b	9.70 ^a	0.423	0.002
Rendimiento en seco (t/ha)	0.539 ^c	0.748 ^{ab}	0.650 ^b	0.799 ^a	0.027	0.001
Eficiencia Agronómica (EA)		1.64 ^{ab}	0.87 ^b	2.04 ^a	0.241	0.046

Letras diferentes en sentido horizontal indican diferencias estadísticas significativas (P -valor < 0.05).

De igual manera, las características de la semilla como peso seco, longitud, ancho e índice de mazorca tampoco se vieron afectadas por la aplicación de nitrógeno (Tabla 3). Se determinó que las semillas de CCN-51 presentan un peso promedio de 1.88 gramos/semilla, 22.82 mm de longitud y 13.60 mm de ancho, y se requiere en promedio 21 frutos para obtener un kilogramo de semilla seca. Aunque no presentó diferencias significativas, el menor índice de mazorca obtenido se atribuye a la aplicación de sulfato de amonio, lo que implica un menor número de frutos, 17.5 frutos, para obtener 1 kg de semilla seca; mientras que, el índice más alto se observó con la aplicación de nitrato de calcio, requiriéndose 7 frutos más para obtener 1 kg de semilla seca.

Variables de rendimiento

El número de frutos por árbol se vio afectado positivamente con la aplicación de diferentes fuentes nitrogenadas, donde la aplicación de sulfato de amonio y nitrato de calcio superó en 6 y 3 frutos al testigo respectivamente ($P = 0.001$; Tabla 3). De igual manera, la producción y el rendimiento varía con la aplicación de nitrógeno en diferentes fuentes ($P = 0.002$ y 0.001 ; Tabla 3). El tratamiento con la aplicación de sulfato de amonio incrementó la producción por planta obteniéndose 9.7 kg de semillas de cacao fresco a diferencia del nitrato de amonio, urea y testigo los cuales no presentaron diferencias significativas entre sí. El rendimiento medio de cacao pasó de 0.539 t/ha sin la aplicación de nitrógeno a 0.799 t/ha con la aplicación nitrógeno en sulfato de amonio, incrementándose un 48%. No

hubo diferencias en rendimiento entre la aplicación de urea y nitrato de calcio los cuales alcanzaron valores de 0.74 y 0.65 t/ha respectivamente.

En consecuencia, la eficiencia agronómica del fertilizante respondió a la fuente de nitrógeno ($P = 0.046$), siendo la eficiencia agronómica mayor con el uso de sulfato de amonio, produciéndose 2.04 kg de semilla seca de cacao CCN-51 por cada kg de unidad de fertilizante utilizado.

Análisis químico de semillas

La aplicación de nitrógeno no incide significativamente en el contenido de cenizas y nitrógeno de las semillas de cacao CCN-51, obteniéndose promedios de 3.16 y 2.35 g/100 gramos de materia seca respectivamente. Sin embargo, existe un efecto del nitrógeno sobre el contenido de grasa en las semillas ($P = 0.023$; Tabla 4). La aplicación de sulfato de amonio incrementó el contenido de grasa en 3.8 gramos (54.1) en comparación con la aplicación de urea, que presentó el valor más bajo con 50.3 g.

Análisis químico del suelo

Se debe considerar que previo al encalado, el pH de la finca experimental fue de 4.7 puntos y después del encalado de 6.69. De acuerdo a los valores de pH obtenidos, durante las distintas fechas evaluadas se observó diferencias significativas entre los tratamientos. Los niveles de pH varían según el tiempo transcurrido después de la fertilización,

disminuyendo progresivamente con el paso del tiempo, obteniéndose los valores más bajos al final del ensayo (Figura 2). En general, el tratamiento con sulfato de amonio causa mayor efecto sobre el pH del suelo disminuyendo hasta llegar a 3.96 puntos, siendo el tratamiento que acidifica en mayor proporción al suelo. De igual manera, la urea acidifica el suelo hasta obtener 4.32 puntos al final del estudio. El nitrato de calcio causa un efecto similar al testigo manteniéndose en valores constantes entre 5 y 6 puntos, registrando al final 5.29 y 5.31 puntos respectivamente, niveles significativamente más elevados que los tratamientos amoniacales.

La concentración de nutrientes en el suelo varía acorde a cada elemento ($P < .0001$; Tabla 5). En el caso del nitrógeno, la urea y el sulfato de amonio presentan las mayores cantidades de N amoniacal en el suelo, 6 veces superiores, en comparación con el testigo y el nitrato de calcio. En cuanto al fósforo, las mayores concentraciones las registran los tratamientos con fuentes nitrogenadas, sulfato de amonio, nitrato de calcio y urea, siendo al menos 10 veces superior al testigo, el cual registró el menor valor con 15.3 ppm. Por el contrario, la aplicación de nitrógeno trae consigo una disminución de Mg en el suelo, ya que el testigo registró el valor más alto de 1,64 meq/100ml en comparación a los

tratamientos que presentaron valores de 0.43 a 0.79 meq/100ml.

Al analizar el potasio, los tratamientos con urea y testigo poseen las mayores concentraciones, en promedio 0.3 meq/100 ml; mientras que, las menores concentraciones se obtuvieron con los tratamientos con nitrato de calcio y sulfato de amonio (0.067 meq/100ml). El nitrato de calcio al contener un porcentaje de Ca, eleva el contenido de este elemento en el suelo en comparación con los demás tratamientos, siendo el sulfato de amonio el que registró los valores más bajos, 1.59 meq/100ml.

DISCUSIÓN

El presente estudio se basa en la influencia de diferentes fuentes minerales nitrogenadas en el cultivo de cacao CCN-51 en el sur de la Amazonía ecuatoriana. La aplicación de nitrógeno en diferentes fuentes no afectó los parámetros morfológicos de los brotes como longitud, TCA, número y longitud de metámeros y área foliar. Esto puede atribuirse a la fase del cultivo, dado que se encontraba en la fase productiva. Durante esta fase, la planta utiliza la mayor cantidad de recursos en la formación de los frutos y semillas, y por lo tanto disminuye progresivamente el crecimiento vegetativo de la planta (Leiva, 2012, Perchlik and Tegeder, 2017).

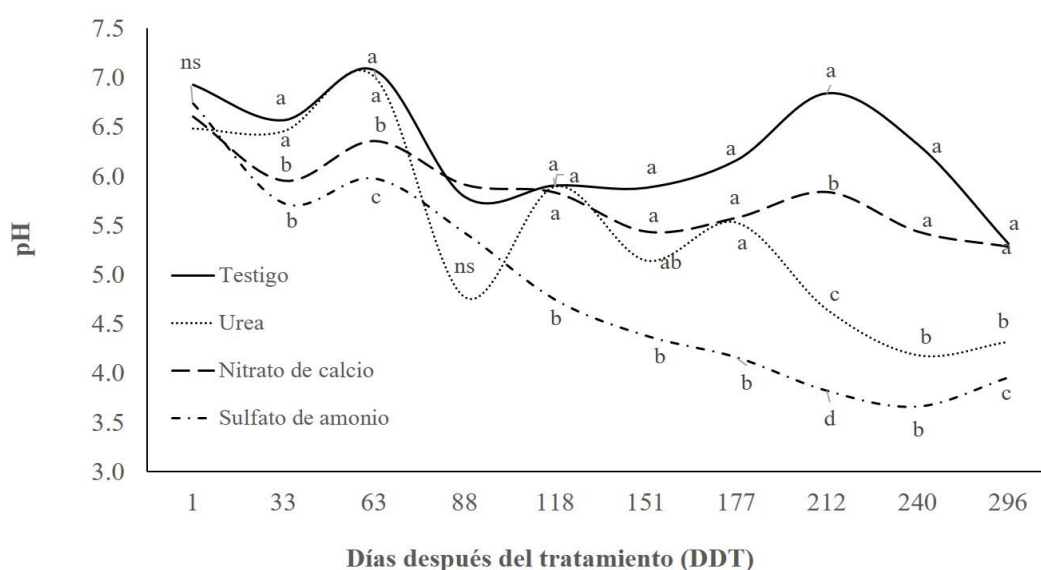


Figura 2. Evolución del pH del suelo en un cultivo de cacao CCN-51 fertilizado con diferentes fuentes nitrogenadas durante 296 días. ns: no significativo. Letras diferentes en sentido vertical indican diferencias estadísticas significativas (P -valor < 0.05).

Tabla 4. Composición química de semillas de cacao CCN-51 por 100 g de materia seca.

Variable	Tratamiento				EEM	P -valor
	Testigo	Urea	Nitrato de calcio	Sulfato de amonio		
Ceniza	3.18	3.24	3.20	3.03	0.092	0.445
Nitrógeno	2.44	2.41	2.33	2.22	0.072	0.170
Grasa	52.9 ^{ab}	50.3 ^c	51.7 ^{bc}	54.1 ^a	0.750	0.023

Letras diferentes en sentido horizontal indican diferencias estadísticas significativas (P -valor < 0.05).

Tabla 5. Efectos de la aplicación de diferentes fuentes de nitrógeno sobre la composición química del suelo en un cultivo de cacao CCN-51.

Variable	Tratamiento				EEM	P-valor
	Testigo	Urea	Nitrato de calcio	Sulfato de amonio		
NH ₄ (ppm)	75.0 ^b	461 ^a	70.3 ^b	487 ^a	8.933	<0.001
P (ppm)	15.3 ^c	150 ^b	190 ^a	198 ^a	10.34	<0.001
K (meq/100ml)	0.277 ^a	0.310 ^a	0.067 ^b	0.067 ^b	0.020	<0.001
Ca (meq/100ml)	4.56 ^b	4.50 ^b	8.29 ^a	1.59 ^c	0.408	<0.001
Mg (meq/100ml)	1.64 ^a	0.790 ^b	0.433 ^c	0.45 ^c	0.079	<0.001

Letras diferentes en sentido horizontal indican diferencias estadísticas significativas (*P*-valor < 0.05)

El testigo presentó similares características en los frutos (peso, longitud, peso y número de semillas por fruto) y semillas (peso seco, longitud y ancho) que los tratamientos nitrogenados. El suelo presentó niveles altos de materia orgánica al inicio del experimento, la cual mediante la nitrificación proporcionó el nitrógeno necesario al testigo para su desarrollo. Al respecto, Krame *et al.*, (2002) indican que la recuperación de nitrógeno en tres sistemas de cultivo (convencional, bajos insumos y orgánico) no fue afectada por la forma de aplicación de nitrógeno, ya sea esta en forma orgánica e inorgánica. Las altas temperaturas y precipitaciones abundantes y frecuentes, características de la región amazónica, podrían haber favorecido el proceso de nitrificación y la disponibilidad de nitrógeno al cultivo (INTA, 1982, Peña-Venegas and Cardona, 2010). Por otra parte, durante la etapa reproductiva de las plantas, el N almacenado en el tallo y las hojas se removiliza y transporta en el floema para desarrollar flores, frutos y semillas (Pate and Flinn, 1973, Schiltz *et al.*, 2005), razón por la cual en este estudio no se presentó diferencias en las características morfológicas de los frutos y semillas en relación al testigo.

El índice de mazorca es un carácter importante en la industria y en la selección de material para mejoramiento genético, siendo preferible seleccionar materiales con un índice menor a 20 mazorcas, como indicador de productividad (Vera, 2014). En este sentido, el sulfato de amonio podría favorecer el índice de mazorca, ya que presentó el menor valor (17.5) a diferencia de la aplicación de nitrato de calcio (24.2) que fue el valor más alto. Estos valores superiores podrían estar relacionados con la menor eficiencia de los fertilizantes nitrogenados en ambientes con elevadas precipitaciones como es la amazonia de Ecuador, lo que podría causar pérdidas del nitrógeno por lixiviación (Kreibich *et al.*, 2003, Ribeiro *et al.*, 2008). Además, se conoce que las pérdidas del nitrógeno en forma de nitrato son superiores comparadas con el amonio (Cameron *et al.*, 2013, Riley *et al.*, 2001), lo que podría explicar el mayor índice de mazorca cuando se usó nitrato de calcio.

En la etapa productiva, las plantas destinan la mayor parte de sus recursos a la formación de frutos y semillas, la deficiencia de nutrientes o la baja eficiencia de los fertilizantes puede afectar el rendimiento de la planta. El uso de nitrógeno, en forma de sulfato de amonio, ejerce un efecto distintivo en relación al número de frutos y a la producción generada por planta, con respecto a los otros tratamientos aplicados. Esta diferenciación puede ser ocasionada por las pérdidas energéticas en el metabolismo de absorción, asimilación y transporte de NH₄⁺ y NO₃⁻. En la asimilación del nitrato, el N del nitrato es convertido en nitrito, luego en amonio y finalmente en nitrógeno amídico en la glutamina. El N absorbido por la planta en forma de NH₄⁺ permite una optimización de energía frente al NO₃⁻. La reducción de nitrato a amonio trae consigo un gasto energético de la planta de 32 moles de fotones por mol de NO₃⁻ asimilado y transportado. Por el contrario, el costo por absorción, transporte, reducción y asimilación de amonio es alrededor de 9.45 moles de fotones por mol de NH₄⁺. Por consiguiente, el amonio suministrado a las plantas ahorraría fotoenergía en comparación al nitrato, cerca de 10 ATP por mol de N (Raven, 1985, Salsac *et al.*, 1987, Guo *et al.*, 2007).

El fertilizante amónico presentó una eficiencia agronómica dos veces mayor al fertilizante nítrico, sin embargo, no existió una diferenciación entre el SA y la urea, dado que esta última aporta N en forma de NH₄⁺, dando como resultado una producción y rendimiento superiores en comparación al NC. Las pérdidas de N reducen la eficiencia de recuperación o de absorción del N aplicado, así como, el rendimiento, y, por consiguiente, la eficiencia agronómica del N (Fageria and Baligar, 2005). El pH de saturación de la urea indica que al reaccionar con el suelo genera una reacción alcalina mayor a 9 puntos de pH, generando pérdidas por volatilización, alrededor del 28 % al cabo de 30 días, con humedad superior al 50% y cuando la temperatura se eleva en un rango de 10 grados se acelera su hidrólisis (Bonelli *et al.*, 2018). Bajo las condiciones de la región amazónica, las pérdidas por volatilización se producen aceleradamente. La reacción residual del fertilizante en el suelo luego de haberse producido toda la reacción produce una disminución

considerable en el pH de la rizósfera, al igual que el SA, la diferencia es que en el caso de este fertilizante el pH de saturación se encuentra en 5.4 al contacto con el suelo, lo que da como resultado pérdidas inferiores por volatilización, cerca de 1.74 % al transcurrir el mismo tiempo (Guerrero, 2004, González and Sadeghian, 2012).

El SA ha mostrado ser muy eficiente en función de que el N amoniacal es menos propenso a pérdidas por lavado y desnitrificación (Barrios *et al.*, 2012). Sin embargo, la eficiencia de las fuentes de nitrógeno depende de la afinidad que tenga la especie vegetal y de otros factores, como el pH, la temperatura, el contenido de glúcidos a nivel radicular y el potencial osmótico (Marschner, 1995; Mengel and Kirkby, 2001). En el caso del cacao, se podría decir que es conveniente el uso del amonio, ya que, incluso en parámetros de crecimiento, ha demostrado su selectividad por esta fuente, y no así por la concentración (Baligar and Fageria, 2017).

Mediante la aplicación de SA se obtuvo un aproximado de 17 mazorcas con una producción de peso fresco de 7.9 kg/planta y un rendimiento de grano seco de 0.799 t/ha, a pesar de ser mayor que los demás tratamientos, resulta un valor bajo en comparación a valores registrados para la variedad CCN-51. Sánchez-Mora *et al.* (2015) registraron un número de 22 mazorcas y un rendimiento en seco de 1.05 t/ha con la aplicación de fertilización completa en la costa ecuatoriana. De igual manera, Cuenca-Cuenca *et al.*, (2019) obtuvieron valores desde 0.995 a 2.39 t/ha, usando NPK en diferentes dosis, en cuanto al testigo (sin NPK) obtuvieron valores de 0.82 t/ha para este clon. En Colombia, se reportaron rendimientos de 2.02 t/ha para CCN-51 con fertilización NPK (Puentes-Páramo *et al.*, 2016) y rendimientos entre 2.3 y 2.8 /ha usando fertilización completa (Ruales-Mora *et al.*, 2011). En todos los casos la densidad de siembra fue de 1111 plantas por hectárea (3 x 3 m), en comparación a la densidad del presente estudio, 816 plantas por hectárea, variable que influye en el rendimiento total. Además, en estos estudios la eficiencia agronómica para el N fue de 16 a 24 kg/kg, mientras que el SA pese a ser más eficiente que el NC y la urea, presentó una eficiencia sumamente baja (2.40 kg/kg); es decir que por cada kg de SA aplicado existe un incremento en el rendimiento de 2.40 kg de semilla, lo que trae consigo valores bajos en cuanto al rendimiento.

Química de semillas

El N forma parte de compuestos estructurales de la planta como proteínas, ácidos nucleicos y parte importante de la clorofila, misma que da lugar a la función asimiladora de carbono y formación de azúcares, grasas, proteínas, vitaminas y hormonas (Hawkesford *et al.*, 2012). La aplicación de SA incrementó el contenido de grasa en las semillas de cacao en comparación a la urea, la naturaleza de este último fertilizante ocasiona pérdidas de N

disminuyendo la cantidad de nutriente disponible para la planta, de esta manera el contenido del nutriente podría favorecer la formación de grasas en las semillas de cacao mediante la modificación de lípidos triacilgliceroles. Estos resultados concuerdan con estudios previos en los que se concluye que la composición lipídica varía según el nivel de nitrógeno al que se encuentre expuesto la planta y según el órgano estudiado (Ruan *et al.*, 2007, Yang *et al.*, 2011, Liu *et al.*, 2017).

El SA se diferencia de los demás tratamientos nitrogenados con el mayor contenido de grasa, sin embargo, la urea y el nitrato de calcio no se diferencian entre sí. La absorción de amonio representa un ahorro energético en la planta frente al nitrato; esto permite al SA ser más eficiente mediante un mejor aprovechamiento del nitrógeno. Además, la composición de ácidos grasos de la manteca de cacao está influenciada por el genotipo, las condiciones climáticas o características del microclima y época de cosecha (Spangenberg and Diosini, 2001, Sukha *et al.*, 2014, Vázquez-Ovando *et al.*, 2015). Así, la variedad CCN-51 podría haberse adaptado a las condiciones del ambiente, reaccionando de mejor manera a pH ácidos como el que provee el SA, dado que la evolución del cacao en general se ha desarrollado en suelos con condiciones de pH ácidos (Prabhakaran, 2010, Zhang and Motilal, 2016).

En cacao, el contenido de grasa es fundamental, ya que este no solo contribuye al sabor si no también facilita el procesamiento industrial como el transporte de la masa de chocolate a través de las tuberías, bombas y máquinas (Almeida-Andrade *et al.*, 2019). Las fábricas procesadoras les dan importancia a los contenidos altos de grasa, superiores al 55 % (FEDECACAO, 2004), valor cercano al obtenido con la aplicación de sulfato de amonio.

Los valores de grasa obtenidos en este estudio, de 50.3 a 54.1 %, son valores cercanos a los registrados por Perea (2011) en Colombia y Almeida-Andrade *et al.*, (2019) en Ecuador, quienes para el clon CCN51 reportan valores promedio de 53.9 y 51.02 % respectivamente. Sin embargo, CCN-51 también puede mostrar contenidos de grasa bajos como 41.44 % registrados en Perú (Almeida-Andrade *et al.*, 2019).

Química de suelo

En el ensayo la evolución de pH con el fertilizante sulfato de amonio tuvo tendencia negativa, disminuyendo hasta 3.96. Datos que concuerdan con los encontrados por Chien *et al.*, (2008), quienes descubrieron que durante el proceso de nitrificación del NH_4^+ del fertilizante a NO_3^- se liberan iones H^+ que pueden producir acidez en el suelo, obteniendo por cada mol de sulfato amonio 4 unidades (moles) de H^+ liberadas, que acidifican el suelo. De igual

manera, Adams (1984) menciona que cada mol proveniente del SA produce 4 moles de H^+ , mientras que cada mol de nitrógeno proveniente de la urea genera 2 moles de H^+ , sugiriendo que la acidez generada por el SA es dos veces mayor que la generada por la urea. En este sentido, Chien *et al.*, (2008) reporta diferencias significativas en la acidez generada por el sulfato de amonio en comparación con la urea en tres tipos de suelo en cultivos de maíz, trigo y frejol; de igual manera, en este estudio se observó que al a final del ensayo el sulfato de amonio acidifica el suelo en mayor proporción que la urea. Estos niveles bajos de pH inhiben la nitrificación, ocasionando la acumulación de NH_4^+ en la rizósfera (Britto and Kronzucker, 2002), esta afirmación concuerda con los resultados obtenidos ya que mediante el uso de estos fertilizantes el contenido de N se elevó significativamente en comparación al nitrato de calcio y el testigo.

Por otra parte, el pH del suelo no fue afectado por la aplicación de nitrato de calcio, presentando un pH de 5.29, sin diferenciarse del testigo. Esto se debe a que las sales de nitrato como $Ca(NO_3)_2$ provienen de ácidos y bases fuertes que no se hidrolizan e incorporan cantidades de Ca al suelo (Zapata, 2004). El Ca es el catión más abundante en el suelo, evita la dispersión de coloides y de esta manera retrasa la acidificación (Ginés and Mariscal-Sancho, 2002). Por lo tanto, la reserva de Ca en el suelo es significativamente superior a los demás tratamientos.

El menor nivel de Ca en el suelo ocurre con la adición de sulfato de amonio, este fertilizante produce una acción descalcificante al formar $CaSO_4$, de naturaleza hiposoluble, el cual es arrastrado en profundidad por la lluvia o el riego (Ginés and Mariscal-Sancho, 2002, Chien *et al.*, 2011, Granja and Covarrubias, 2018). Además, la aplicación de sulfato de amonio, también presentó niveles bajos de Mg, similar a los observados con el nitrato de calcio y urea. Algunos autores indican que en suelos ácidos con pH inferior a 5.5 se genera un efecto de competencia del Al^{3+} con cationes como Ca^{+2} y Mg^{+2} en los sitios de intercambio de las arcillas (Casierra-Posada and Aguilar-Avenidaño, 2007).

La aplicación de N en forma de sulfato de amonio disminuye la concentración de K, Ca y Mg en el suelo, debido a que este compite con las bases en los sitios de intercambio de la solución del suelo. Además, en regiones tropicales con altas precipitaciones se lixivia el Mg, e incrementa los niveles de competencia con amonio (Guo *et al.*, 2016).

En relación al fósforo en el suelo, los tratamientos con nitrato de calcio y sulfato de amonio tuvieron los mayores valores de P, mientras que el testigo exhibió las menores concentraciones, lo cual indica que la

aplicación de fertilizantes nitrogenados tiende a incrementar el contenido de fósforo en el suelo. Como consecuencia de la nitrificación se aumenta la solubilidad de los compuestos de fósforo en suelos alcalinos, teniendo mayor efecto las sales de amonio que las de nitrato. También al aplicar nitrato de calcio, el calcio posee una acción estimulante en la absorción de fósforo (Adams, 1980, Wang and Harrell, 2005, Krouk and Kiba, 2020). La forma en que la planta toma el nitrógeno (nitrato o amonio) repercute en la toma de fósforo, si el nitrógeno se absorbe como amonio se segregan protones disminuyendo el pH; por el contrario, si es absorbido como nitrato, se desplazan mayor cantidad de aniones incrementando el pH (Baber, 1984, Fageria and Baligar, 2005, Norton *et al.*, 2015).

El tratamiento con urea presentó las mayores concentraciones de potasio en el suelo, favoreciendo su disponibilidad para la planta. Estos resultados no concuerdan con Fernández (1984), quien menciona que la urea al disminuir el pH influye en una pérdida de bases como: Ca, Mg, K y Na. Además, al tener la urea un efecto amoniacal, el amonio puede influir en la absorción y acumulación de potasio, posiblemente por que compite con él para ingresar a la célula (Szczerba *et al.*, 2006).

CONCLUSIONES

Las características morfológicas del cacao CCN-51 no fueron afectadas por las fuentes nitrogenadas; el crecimiento de brotes, así como las características morfológicas de los frutos y semillas fueron similares en el testigo y en los tratamientos en los que se añadió nitrógeno mineral bajo las condiciones de la Amazonía ecuatoriana.

La aplicación de sulfato de amonio permite obtener un mayor rendimiento en comparación a los demás tratamientos, además, presenta una mayor concentración de grasa en la semilla, característica de gran importancia para la industria chocolatera. Sin embargo, se debe considerar su efecto acidificante en el suelo.

Las aplicaciones de nitrato de calcio y sulfato de amonio incrementaron la concentración de fósforo en el suelo, pero redujo la concentración de potasio y magnesio. Adicionalmente, la aplicación de nitrógeno en forma sulfato de amonio afectó positivamente la concentración de nitrógeno amoniacal y negativamente la concentración de calcio en el suelo.

Agradecimientos

Al señor Augusto Carrión, propietario del cultivo de cacao en la parroquia Guadalupe.

Funding. Supported by Project 09-DI-FARNR-2021 (National University of Loja) competitive grant.

Conflict of interests. Nothing to declare.

Compliance with ethical standards. The nature of the present work does not require approval by an ethical committee.

Data availability: Data are available with Mirian Capa-Morocho, mirian.capa@unl.edu.ec, upon reasonable request.

CRedit statement. Capa-Morocho, M: Formal analysis and Writing – review & editing; Romero-Maza, A: Investigation, Writing – original draft; Romero, M: Investigation, Molina, M: Funding acquisition and Visualization; Vásquez, S: Resources and Supervision; and, Granja, F: Conceptualization and Project administration.

REFERENCIAS

- Adams, F., 1980. Interactions of Phosphorus with Other Elements in Soils and in Plants. In: F. Khasawneh, E. Sample and E. Kamprath, ed. *The role of phosphorus in agriculture* American Society of Agronomy: Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America. Book Series. ASA, CSSA, and SSSA Books, pp. 655-680.
<https://doi.org/10.2134/1980.roleofphosphorus.c24>
- Adams, F., 1984. Crop response to lime in the southern United States. In: F. Adams, ed. *Soil Acidity and Liming*. Madison, WI: ASA-CSSA-SSSA. pp. 211–265.
<https://doi.org/10.2134/agronmonogr12.2e.d.c5>
- Almeida-Andrade, J., Rivera-García, J., Chire-Fajardo, G., and Ureña-Peralta, M., 2019. Propiedades físicas y químicas de cultivares de cacao (*Theobroma cacao* L.) de Ecuador y Perú. *Enfoque UTE*, 10(4), pp.1-12.
- Amores, F., Vasco, S., Eskes, A., Suarez, C., Quiroz, J., Loor, R., Jiménez, J., Zambrano, J., Bolaños, M., Reynel, V., Terán, M., and Quijano, G., 2011. Selección en campo y en la estación de nuevas variedades de cacao en Ecuador. En: Eskes, AB (ed.). *Enfoques colaborativos y participativos para la mejora de la variedad de cacao*. Informe final del proyecto CFC / ICCO / Bioversity International sobre la productividad del cacao y la mejora de la calidad: un enfoque participativo (2004-2010). Fondo Común para los Productos Básicos (CFC), Amsterdam, Países Bajos; Intl. Cacao Organization (ICCO), Londres, Reino Unido; Bioversity Intl., Roma, Italia, pp. 59-72.
- Alsam, M., Chattha, M., Khan, I., Maqbool, R., Chattha, M., Hussan, F., Nawaz, M., Hanif, M., Ayub, M., Aslam, M., Khan, M. and Hassan, M., 2021. Effect of Different Organic Mulches and Nitrogen Sources on the Productivity of Wheat Crop Grown in Semi-Arid Area. *Pakistan Journal of Agricultural Research*, 34(3), pp. 648-655.
<https://dx.doi.org/10.17582/journal.pjar/2021/34.3.648.655>
- AOAC, 2016. *Official methods of analysis of AOAC International*. 20 ed. AOAC, ESTADOS UNIDOS: Editorial Gaithersburg. ISBN: 68683, pp.700.
- Baldoncini, A., 2015. Efectos de la aplicación de fertilizantes sobre el pH de suelos serie Oncativo. En *Sistemas Agrícolas de Producción Intensivos*. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cordoba, Argentina. pp.22.
- Baligar, V., and Fageria, N., 2017. Influence of nitrogen forms and levels on the growth and nutrition of cacao. *Journal of Plant Nutrition*, 40(5), pp. 709-718.
<https://doi.org/10.1080/01904167.2016.1262401>
- Barber, S., 1984. Nutrient balance and nitrogen use. In: R.D. Hauck, ed. *Nitrogen in Crop Production*. Madison, WI: ASA, CSSA, SSSA, pp. 87-95.
- Barrios, M., García, J., and Basso, C., 2012. Efecto de la fertilización nitrogenada sobre el contenido de nitrato y amonio en el suelo y la planta de maíz. *Bioagro*, 24(3), pp. 213-220.
- Bastías R., Diez F. and Finot V. 2014. Absolute and relative growth rates as indicators of fruit development phases in sweet cherry (*Prunus avium*). *Chilean Journal of Agricultural and Animal Science*, ex *AgroCiencia*, 30(2), pp. 89-98.
- Bonelli, L., Sainz-Rozas, H., Echeverría, H., and Barbieri, P., 2018. Fuente y momento de aplicación de nitrógeno en maíz bajo siembra directa en Balcarce. *Ciencia del suelo*, 36(1), pp. 88-98. Accedido: 24 de agosto de 2021.

- Britto, D., and Kronzucker, H., 2002. NH_4^+ toxicity in higher plants: A critical review. *Journal of Plant Physiology*, 159(6), pp. 567-584. <https://doi.org/10.1078/0176-1617-0774>
- Cameron, K., Di, H., and Moir, J., 2013. Nitrogen losses from the soil/plant system: a review. *Annals of Applied Biology*, 162(2), pp. 145-173. <https://doi.org/10.1111/aab.12014>
- Casierra-Posada, F., and Aguilar-Avenidaño, O., 2007. Stress for aluminum in plants: reactions in the soil, symptoms in plants and amelioration possibilities. A review. *Revista colombiana de ciencias hortícolas*, 1(2), pp. 246-257. <https://doi.org/10.17584/rcch.2007v1i2.8701>
- Chien, S., Gearhart M. and Collamer, D., 2008. The effect of the different ammoniacal nitrogen sources on soil acidification. *Soil Science*, 173(8), pp. 544-55. <https://doi.org/10.1097/SS.0b013e31817d9d17>
- Chien, S.H., Gearhart, M.M., and Villagarcía, S. 2011. Comparison of ammonium sulfate with other nitrogen and sulfur fertilizers in increasing crop production and minimizing environmental impact: a review. *Soil Science*, 176(7), pp. 327-335.
- Cuenca-Cuenca, E., Puentes-Páramo, Y., and Menjivar-Flores, J., 2019. Efficient use of nutrients in fine aroma cacao in the province of Los Ríos-Ecuador. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 72(3), pp. 8963-8970. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v72n3.74862>
- DeAndrade, F., Buzetti, S., Andreotti, M., Arf, O., de Sá, M., and daCosta, J., 2009. Sources and times of nitrogen application on irrigated corn crop. *Semina: Ciências Agrárias*, 30(2), pp. 275-284. <http://dx.doi.org/10.5433/1679-0359.2009v30n2p275>
- FAO, 2020. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Plataforma multiagencia de cacao para América Latina y el Caribe "Cacao 2030-2050". Acceso: 11 de marzo de 2022. Disponible en: <https://www.fao.org/family-farming/detail/es/c/1402133/>
- FAO/STAT, 2022. Data. Countries by commodity. Acceso: 8 de marzo de 2022. Disponible en: https://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries_by_commodity_exports
- Fageria, N., and Baligar, V., 2005. Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants. *Advances in Agronomy*, 88, pp. 97-185. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(05\)88004-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(05)88004-6)
- FEDECACAO, 2004. El beneficio y características físico químicas del cacao (*Theobroma cacao* L.). Programa de comercialización. Produmedios. Bogotá-Colombia. pp. 42. Disponible en: https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/18060/42772_46877.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Fernández M., 1984. La urea, fertilizante nitrogenado. Investigación y Progreso Agropecuario La Platina. Acceso: 22 de febrero de 2022. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.14001/28476>
- Furcal-Beriguete, P., 2017. Extracción de nutrientes por los frutos de cacao en dos localidades en Costa Rica. *Agronomía Mesoamericana*, 28 (1), pp. 113-129. <https://doi.org/10.15517/am.v28i1.23236>
- García-Briones, A., Pico-Pico, B., and Jaimez, R. 2021. La cadena de producción del Cacao en Ecuador: Resiliencia en los diferentes actores de la producción. *Novasinerгия*, 4(2), pp. 152-172. <https://doi.org/10.37135/ns.01.08.10>
- Gardiazabal, F., Mena, F., and Magdahl, C., 2007. Efecto de la fertilización con inhibidores de la nitrificación (Entec® Solub 21) en paltos (*Persea americana* Mill) cv. Hass. In Actas VI Congreso Mundial del Aguacate. Viña del Mar, Chile.
- Ghulam, H., Al-jaloud, A., and Karimulla, S., 1996. Effect of treat de fluent irrigation and nitrogen on yield and nitrogen use efficiency of wheat. *Agricultural Water Management*, 30, pp. 175-184.
- Ginés, I., and Mariscal-Sancho, I., 2002. Incidencia de los fertilizantes sobre el pH del suelo. Fertiberia. Acceso: 22 de enero de 2022. Disponible en: https://oa.upm.es/3176/2/MARISCAL_MONO_2002_01.pdf

- González, O., and Sadeghian K., 2012. Volatilización del nitrógeno a partir de diferentes fuentes fertilizantes en la etapa de crecimiento vegetativo del café. *Revista Cenicafé*, 63, pp. 132-143.
- Granja, F., and Covarrubias, J., 2018. Evaluation of acidifying nitrogen fertilizers in avocado trees with iron deficiency symptoms. *Journal of soil science and plant nutrition*, 18(1), pp. 157-172. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162018005000702>
- Graziani, L., Ortiz, L., Angulo, J., and Parra, P., 2002. Características físicas del fruto de cacao tipos criollo, forastero y trinitario de la localidad de cumboto, Venezuela. *Agronomía Tropical*, 52(3), pp. 343-362.
- Guerrero, R., 2004. Propiedades generales de los fertilizantes sólidos: Manual Técnico. 4 ed. Bogotá: Monómeros Colombo Venezolanos, pp. 46.
- Guo, S., Zhou, Y., Shen, Q., and Zhang, F., 2007. Effect of ammonium and nitrate nutrition on some physiological processes in higher plants - Growth, photosynthesis, photorespiration, and water relations. *Plant Biology*, 9, pp. 21-29. <https://doi.org/10.1055/s-2006-924541>
- Guo, W., Nazim, H., Liang, Z., and Yang, D., 2016. Magnesium deficiency in plants: An urgent problema. *The Crop Journal*, 4(2), pp.83-91. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2015.11.003>
- Hawkesford, M., Horst, W., Kichey, T., Lambers, H., Schjoerring, J., Møller, I., and White, P., 2012. Functions of macronutrients. In: Marschner P, editor. *Marschner's mineral nutrition of higher plants*. 3rd ed. Amsterdam: Academic, pp. 135-189. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00006-6>
- Herrera, R., Vásquez, S.C., Granja, F., Molina-Müller, M., Capa-Morocho, M., and Guamán, A. 2022. Interacción de N, P y K sobre características del suelo, crecimiento y calidad de frutos de cacao en la Amazonía Ecuatoriana. *Bioagro* 34(3). (In press)
- Ilbay-Yupa, M., Lavado-Casimiro, W., Rau, P., Zubieta, R., and Castellón, F. 2021. Updating regionalization of precipitation in Ecuador. *Theoretical and Applied Climatology*, 143, pp. 1513-1528. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03476-x>
- INIAP, 2002. *Metodologías de análisis físico químico de suelos, aguas y foliares*. Tercera edición, Quito: Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias.
- INTA, Instituto Nacional de tecnología Agropecuaria. 1982. Efecto de la temperatura y la humedad sobre la producción de nitratos en argiudoles. Impreso: Servicio de comunicaciones y relaciones públicas de la EERA Rafaela, Argentina. pp. 18.
- Jaimez, R., Barragan, L., Fernández-Niño, M., Wessjohann, L., Cedeño-García, G., Sotomayor Cantos, I., and Arteaga, F., 2022. Theobroma cacao L. cultivar CCN 51: a comprehensive review on origin, genetics, sensory properties, production dynamics, and physiological aspects. *PeerJ*, 10, e12676. <https://doi.org/10.7717/peerj.12676>
- Jerez, A., 2017. El mundo quiere cacao. Divulgación científica, N°1. Universidad del Rosario. Bogotá, Colombia, pp. 83-85.
- Kaymak H. 2013. Effect of nitrogen forms on growth, yield and nitrate accumulation of cultivated purslane (*Portulaca oleracea* L.). *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 19 (3), pp. 444-449.
- Kramer, A., Doane, T., Horwath, R., and van Kessel, C. 2002. Short-term nitrogen-15 recovery vs. long-term total soil N gains in conventional and alternative cropping systems. *Soil Biology and Biochemistry*, 34(1), pp. 43-50. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(01\)00149-3](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(01)00149-3)
- Kreibich, H., Lehmann, J., Scheufele, G., and Kern, J., 2003. Nitrogen availability and leaching during the terrestrial phase in a várzea forest of the Central Amazon floodplain. *Biology and Fertility of Soils*, 39(1), pp. 62-64. <https://doi.org/10.1007/s00374-003-0670-x>
- Krouk, G., and Kiba, T., 2020. Nitrogen and phosphorus interactions in plants: from agronomic to physiological and molecular insights. *Current Opinion in Plant Biology*,

- 57, pp. 104-109. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2020.07.002>
- Kumar, R. 2009. Calibration and validation of regression model for non-destructive leaf area estimation of saffron (*Crocus sativus* L.). *Scientia Horticulturae*, 122(1), pp. 142-145. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2009.03.019>
- Leiva, E., 2012. Aspectos para la nutrición del Cacao *Theobroma cacao* L. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín Facultad de Ciencias Agropecuarias. Acceso: 25 de marzo 2022. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/55148>
- Liu, M., Burgos, A., Ma, L., Zhang, Q., Tang, D., and Ruan, J., 2017. Lipidomics analysis unravels the effect of nitrogen fertilization on lipid metabolism in the tea plant (*Camellia sinensis* L.). *BMC Plant Biology*. 17(165). <https://doi.org/10.1186/s12870-017-1111-6>
- Ma, Q., Wang, X., Li, H., Zhang, F., Rengel Z., and Shen J., 2015. Comparing localized application of different N fertilizer species on maize grain yield and agronomic N-use efficiency on a calcareous soil. *Field Crops Research*, 180, pp. 72-79. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.05.011>
- Mariscal-Sancho, I. and Ginés, I., 2002. Incidencia de los fertilizantes sobre el pH del suelo. [En línea]. Fertiberia S.A. Archivo Digital de la Universidad Politécnica de Madrid, pp. 9. Disponible en: https://oa.upm.es/3176/2/MARISCAL_MONO_2002_01.pdf
- Marschner, H., 1995. Mineral nutrition of higher plants, 2nd ed., New York: Academic Press.
- Mengel, K., and Kirkby, E., 2001. Principles of Plant Nutrition, 5th ed., Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Molina, J., and Covarrubias, J., 2019. Influence of nitrogen on physiological responses to bicarbonate in a grapevine rootstock. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 19(2), pp. 305-312. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00030-1>
- Morais, F., 1998. Respostas do cacauzeiro à aplicação de N, P e K em dois solos da Amazônia Brasileira. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, 22(1). <https://doi.org/10.1590/S0100-06831998000100009>
- Müller, M., Serrano-Minar, P., and Biehl, B., 1992. Photosynthetic characteristics during development of leaves from *Theobroma cacao* L. *Physiologia Plantarum*, 853(A105), 599.
- Niemenak, N., Cilas, C., Rohsius, C., Bleiholder, H., Meier, U., and Lieberei, R., 2010. Phenological growth stages of cacao plants (*Theobroma* sp.): codification and description according to the BBCH scale. *Annals Applied Biology*, 156(1), pp.13-24. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2009.00356.x>
- Norton, R., Davidson, E., and Roberts, T., 2015. Nitrogen use efficiency and nutrient performance indicators. *Global Partnership on Nutrient Management*, pp. 14. Acceso: 5 de junio de 2022. Disponible en: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/10750/Nutrient_use.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Olson, R., and Swallow, C., 1984. Fate of labeled nitrogen fertilizer applied to winter wheat for five years. *Soil Science Society of America Journal*. 48, pp. 583–586. <https://doi.org/10.2136/sssaj1984.03615995004800030023x>
- Pate, J., and Flinn, A., 1973. Carbon and nitrogen transfer from vegetative organs to ripening seeds of field pea (*Pisum arvense* L.). *Journal of Experimental Botany*, 24, pp. 1090–1099.
- Peña-Venegas, C., and Cardona, G., 2010. Dinámica de los suelos amazónicos: Procesos de degradación y alternativas para su recuperación. Primera edición. Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas –Sinchi. Bogotá-Colombia. ISBN 978-958-8317-62-5. pp. 115. Disponible en: <https://www.sinchi.org.co/files/publicaciones/publicaciones/pdf/librosuelosweb.pdf>
- Perchlik, M., and Mechthild T., 2017. Improving Plant Nitrogen Use Efficiency through Alteration of Amino Acid Transport

- Processes. *Plant Physiology*, 175(1), 235-247. <https://doi.org/10.1104/pp.17.00608>
- Perea, J., Ramírez, O., and Villamizar, A. 2011. Caracterización físicoquímica de materiales regionales de cacao colombiano (en línea). UNICAUCA. *Bioteología en el sector Agropecuario y Agroindustrial*. 9(1), pp. 35-42.
- Pineda-Taco, R., Olivas-Alvarado, T., Rodríguez-Soto, G., and Castro-Cepero, V., 2020. Effect of nitrogen and phosphorus fertilization sources on the potato crop yield (*Solanum tuberosum* L.). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 73(3), pp. 9255-9261. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v73n3.82624>
- Portilla Farfán, F. 2018. *Agroclimatología del Ecuador*. Primera edición. Quito, Ecuador: Editorial Universitaria Abya- Yala. ISBN: 978-9978-10-310-4
- Prabhakaran, K., 2010. Cocoa (*Theobroma cacao* L.). In: K.P. Prabhakaran, eds. *The Agronomy and Economy of Important Tree Crops of the Developing World*. Berkeley: Elsevier. pp. 131-180.
- Puentes-Páramo, Y., Menjivar-Flores, J., and Aranzazu-Hernández, F., 2014. Eficiencias en el uso de nitrógeno, fósforo y potasio en clones de cacao (*Theobroma cacao* L.). *Bioagro*, 26(2), pp. 99-106.
- Puentes-Páramo, Y., Menjivar-Flores, J. and Ortíz, A., 2016. Eficiencia fisiológica de uso de NPK en clones autoincompatible y autocompatible de cacao (*Theobroma cacao* L.) en Colombia. *Revista de investigación agraria y ambiental*, 7(1), pp. 17-24. <https://doi.org/10.22490/21456453.1536>
- Quintero, C., Prats, F., Zamero, M., Arévalo, E., Spinelli, N., and Boschetti G., 2011. Absorción de nitrógeno y rendimiento de arroz con diferentes formas de nitrógeno aplicado previo al riego. *Ciencia del suelo*, 29(2), pp. 233-239.
- Raven, J., 1985. Regulation of pH and generation of osmolarity in vascular plants: a cost-benefit analysis in relation to efficiency of use of energy, nitrogen and water. *New Phytologist*, 101(1), pp. 25-77. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1985.tb02816.x>
- Ribeiro, M., Da Silva, J., Aitken, W., Machado, R., and Baligar, V., 2008. Nitrogen use efficiency in cacao genotypes. *Journal of Plant Nutrition*, 31(2), pp. 239-249. <https://doi.org/10.1080/01904160701853720>
- Riley, W, Ortiz-Monasterio, I., and Matson, P., 2001. Nitrogen leaching and soil nitrate, nitrite, and ammonium levels under irrigated wheat in Northern Mexico. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 61(3), pp. 223-236. <https://doi.org/10.1023/A:1013758116346>
- Robertson, G., and Groffman, P., 2007. Nitrogen transformations. In: E.A. Paul, ed. *Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry*. New York: Springer. pp. 341-364.
- Romero-Lozada, M., Enciso, C., Garcia, S., Guerrero, J., Puentes-Páramo, Y., and Menjivar J., 2016. Eficiencia de uso de nutrientes en ají tabasco (*Capsicum frutescens* L.) y habanero (*Capsicum chinense* Jacq). *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 7(2), pp. 121-127. <https://doi.org/10.22490/21456453.1562>
- Rosas-Patiño, G., Puentes-Páramo, Y., and Menjivar-Flores, J., 2017. Relación entre el pH y la disponibilidad de nutrientes para cacao en un entisol de la Amazonia colombiana. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 18(3), pp. 529-541. https://doi.org/10.21930/rcta.vol18_num3_art:742
- Rosas-Patiño, G., Puentes-Páramo, Y., and Menjivar-Flores, J., 2019. Efecto del encalado en el uso eficiente de macronutrientes para cacao (*Theobroma cacao* L.) en la Amazonia colombiana. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 20(1), pp. 5-16. https://doi.org/10.21930/rcta.vol20_num1_art:1247
- Ruales-Mora, J., Burbano, H., and Ballesteros, W., 2011. Efecto de la fertilización con diversas fuentes sobre el rendimiento de cacao (*Theobroma cacao* L.). *Revista de Ciencias Agrícolas*, 28(2), pp. 81-94.
- Ruan, J., Gerendas, J., Hardter, R., and Sattelmacher, B., 2007. Effect of root zone pH and form

- and concentration of nitrogen on accumulation of quality-related components in green tea. *Journal of the Science of Food Agriculture*, 87(8), pp. 1505–1516.
<https://doi.org/10.1002/jsfa.2875>
- Rubel, F., and Kottek, M., 2010. Observed and projected climate shifts 1901-2100 depicted by world maps of the Köppen-Geiger climate classification. *Meteorologische Zeitschrift*, 19(2), pp. 135-141.
<https://doi.org/10.1127/0941-2948/2010/0430>
- Salsac, L., Chaillou, S., Morot-Gaudry, J., Lesaint, C., and Jolivet, E., 1987. Nitrate and ammonium nutrition in plants. *Plant Physiology and Biochemistry*. 25, pp. 805–812.
- Sánchez-Mora, F., Medina-Jara, S., Díaz-Coronel, G., Ramos-Remache, R., Vera-Chang, J., and Vásquez-Morán, V., 2015. Potencial sanitario y productivo de 12 clones de cacao en Ecuador. *Revista Fitotecnica*, 38(3), pp. 265-274.
- SAS Institute, 2021. SAS OnDemand for Academics. SAS Institute Inc. Cary, North Carolina, USA. 27513.
- Schiltz, S, Munier-Jolain, N., Jeudy, C, Burstin, J., and Salon, C., 2005. Dynamics of exogenous nitrogen partitioning and nitrogen remobilization from vegetative organs in pea revealed by ¹⁵N in vivo labeling throughout seed filling. *Plant Physiology*. 137, pp. 1463–1473.
<https://doi.org/10.1104/pp.104.056713>
- SIPA, 2021. Sistema de Información Pública Agropecuaria. Cifras agro productivas. Acceso: 10 de marzo de 2022. Disponible en:
<http://sipa.agricultura.gob.ec/index.php/cifras-agroproductivas>.
- Spangenberg, J. and Dionisi, F., 2001. Characterization of Cocoa Butter and Cocoa Butter Equivalents by Bulk and Molecular Carbon Isotope Analyses: Implications for Vegetable Fat Quantification in Chocolate. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49(9), pp. 4271-4277.
<https://doi.org/10.1021/jf001509g>
- Sukha, D., Butler, D., Comissiong, E., and Umaharan, P. 2014 The impact of processing location and growing environment on flavor in cocoa (*Theobroma cacao* L.)—implications for “Terroir” and certification. *Acta Horticulturae* (ISHS) 1047, pp. 255–262.
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1047.31>
- Szczerba, M., Britto, D., and Kronzucker, H., 2006. Rapid, futile K⁺ cycling and pool-size dynamics define low-affinity potassium transport in barley. *Plant Physiology*, 141(4), pp. 1494-1507.
<https://doi.org/10.1104/pp.106.082701>
- Van Vliet, J., Slingerland, M., and Giller, K., 2015. Mineral Nutrition of Cocoa. A Review. Wageningen: Wageningen University and Research Centre, pp. 57.
- Vázquez-Ovando, A., Molina-Freaner, F., Nuñez-Farfán, J., Betancur-Ancona, D., and Salvador-Figueroa, M. 2015. Classification of cacao beans (*Theobroma cacao* L.) of southern Mexico based on chemometric analysis with multivariate approach. *European food research & technology*, 240, pp. 1117-1128.
<https://doi.org/10.1007/s00217-015-2415-0>
- Vera, J., Vallejo, C., Párraga, D., Morales, W., Macías, J., and Ramos, R., 2014. Atributos físicos-químicos y sensoriales de las almendras de quince clones de cacao nacional (*Theobroma cacao* L.) en el Ecuador. *Ciencia y Tecnología*, 7, pp. 21-34. <https://doi.org/10.18779/cyt.v7i2.139>
- Voora, V., Bermúdez S., and Larrea C., 2019. Global Market report: Cocoa. Sustainable commodities Marketplace series 2019. Published by the International Institute for Sustainable Development. Winnipeg, Manitoba, Canadá. Acceso: 10 de marzo de 2022. Disponible en:
<https://www.iisd.org/system/files/publications/ssi-global-market-report-cocoa.pdf>
- Wang, J., and Harrell, D., 2005. Effect of ammonium, potassium, and sodium cations and phosphate, nitrate, and chloride anions on zinc sorption and lability in selected acid and calcareous soils. *Soil Science Society of America Journal*, 69(4), pp. 1036-1046.
<https://doi.org/10.2136/sssaj2004.0148>

- Wuest, S., and Cassman, K., 1992. Fertilizer-nitrogen use efficiency of irrigated wheat: I. Uptake efficiency of preplant versus late-season application. *Agronomy Journal*. 84, pp. 682–688. <https://doi.org/10.2134/agronj1992.00021962008400040028x>
- Yan, M., Pan, G., Lavallee, J., and Conant, R., 2020. Rethinking sources of nitrogen to cereal crops. *Global Change Biology*, 26(1), pp. 191-199. <https://doi.org/10.1111/gcb.14908>
- Yang Y, Yu X, Song L, and An C., 2011. ABI4 activates DGAT1 expression in Arabidopsis seedlings during nitrogen deficiency. *Plant Physiology*. 156(2), pp. 873–883. <https://doi.org/10.1104/pp.111.175950>
- Zapata H., 2004. La química de la acidez del suelo. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín Facultad de Ciencias. Acceso: 30 de julio del 2021. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/3280>
- Zhang, D., and Motilal, L., 2016. Origin, Dispersal, and Current Global Distribution of Cacao Genetic Diversity. In: B. Bailey and L. Meinhardt, eds. *Cacao Diseases*. New York: Springer, Cham. pp.29. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24789-2_1