



Algoritmo para identificar las causas de brechas de rendimientos en sistemas de producción bananeros Ecuatorianos

Algorithm to identify the causes of yield gaps in Ecuadorian bananer production systems

Algoritmo para identificar as causas das lacunas de rendimento nos sistemas de produção de banana equatorianos

Pedro Javier Cornejo-Reyes ^I
pedro.cornejo@esPOCH.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-8256-9732>

Ángel Patricio Mena-Reinoso ^{II}
angel.mena@esPOCH.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-3216-163X>

Evelyn Geovanna Inca-Balseca ^{III}
evelyn.inca@unach.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-7055-9019>

Cristian Luis Inca-Balseca ^{IV}
cristianl.inca@esPOCH.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-4795-8297>

Correspondencia: pedro.cornejo@esPOCH.edu.ec

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

* **Recibido:** 27 de marzo de 2022 * **Aceptado:** 17 de abril de 2022 * **Publicado:** 16 de mayo de 2022

- I. Recursos Naturales, Agronomía, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Riobamba, Ecuador.
- II. Facultad de Informática y Electrónica, Software, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Riobamba, Ecuador
- III. Facultad de Ciencias de la Educación, Humanas y Tecnologías, Pedagogía de las Ciencias, Matemática y Física, Universidad Nacional de Chimborazo (UNACH), Riobamba, Ecuador.
- IV. Facultad de Informática y Electrónica, Tecnologías de la Información, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Riobamba, Ecuador.

Resumen

Los rendimientos agrícolas esperados muchas veces no son alcanzados en términos reales a esta diferencia se le denomina brecha de rendimiento y puede deberse a factores agronómicos, ambientales o edáficos los cuales pueden ser determinados por procedimiento estadísticos, por lo que objetivo de esta investigación fue desarrollar un algoritmo para identificar las brechas de rendimientos en el cultivo del banano, el cual es principal rubro exportador del Ecuador. Para ello se tomaron datos de rendimiento por superficie en las provincias de Cotopaxi, Morona Santiago, Guayas, Sana Elena y el Oro, se consideraron para la determinación de las brechas las variables climáticas (temperatura y precipitación) y edáficas (materia orgánica, pH, CE, P y K). Las brechas fueron determinadas mediante el cálculo de los promedios y diferencia con los valores máximos y a través de un análisis de regresión múltiple y correlación el cual fue comprobado mediante análisis de componentes principales (ACP). Los resultados muestran que existe una brecha marcada entre las provincias de Guayas, Santa Elena y Oro, las cuales presentan los mayores rendimientos debidos a mejores condiciones climáticas y edáficas para la producción de banano, sin embargo, estas diferencias con respecto a las otras provincias se pueden deberse a la degradación de la tierra, el cambio climático e inadecuado manejo agronómico, por lo que se deben determinar estos parámetros mediante la brecha de rendimiento cuyo algoritmo demostró ser eficiente para la cuantificación de la misma y cuya aplicación se puede extender a otros rubros agrícolas.

Palabras claves: análisis multivariado; estimación; regresión; rendimiento; variabilidad.

Abstract

The expected agricultural yields are often not achieved in real terms, this difference is called yield gap and may be due to agronomic, environmental or edaphic factors which can be determined by statistical procedures, so the objective of this research was to develop an algorithm to identify the yield gaps in the banana crop, which is the main exporter of Ecuador. For this purpose, yield data per area were collected in the provinces of Cotopaxi, Morona Santiago, Guayas, Sana Elena and El Oro, and the climatic variables (temperature and precipitation) and edaphic variables (organic matter, pH, EC, P and K) were considered for the determination of the gaps. The gaps were determined by calculating the averages and the difference with the maximum values and through a multiple regression and correlation analysis, which was checked by means of principal component analysis (PCA). The results show that there is a marked gap between the provinces of

Guayas, Santa Elena and Oro, which have the highest yields due to better climatic and soil conditions for banana production, however, these differences with respect to the other provinces may be due to land degradation, climate change and inadequate agronomic management, so this should be determined through the yield gap whose algorithm proved to be efficient for the quantification of the same and whose application can be extended to other agricultural crops.

Keywords: multivariate analysis; estimation; Regression; performance; variability.

Resumo

Os rendimentos agrícolas esperados muitas vezes não são alcançados em termos reais, essa diferença é chamada de gap de rendimento e pode ser devido a fatores agrônômicos, ambientais ou edáficos que podem ser determinados por procedimentos estatísticos, então o objetivo desta pesquisa foi desenvolver um Algoritmo para identificar lacunas de rendimento no cultivo de banana, que é o principal item de exportação no Equador. Para isso, foram obtidos dados de produtividade por superfície nas províncias de Cotopaxi, Morona Santiago, Guayas, Sana Elena e El Oro, variáveis climáticas (temperatura e precipitação) e variáveis edáficas (matéria orgânica, pH, CE, P e K). Os gaps foram determinados calculando as médias e diferenças com os valores máximos e através de uma regressão múltipla e análise de correlação, que foi verificada por análise de componentes principais (PCA). Os resultados mostram que há uma lacuna acentuada entre as províncias de Guayas, Santa Elena e Oro, que apresentam os maiores rendimentos devido às melhores condições climáticas e edafológicas para a produção de banana, no entanto, essas diferenças em relação às outras províncias podem ser devido à degradação da terra, mudanças climáticas e manejo agrônômico inadequado, portanto, esses parâmetros devem ser determinados através do gap de rendimento, cujo algoritmo se mostrou eficiente para sua quantificação e cuja aplicação pode ser estendida a outros itens agrícolas.

Palavras-chave: análise multivariada; estimativa; regressão; Desempenho; variabilidade.

Introducción

El análisis de brecha de rendimiento es usado para identificar y jerarquizar los factores que pueden explicar las diferencias en el rendimiento de un cultivo bajo distintos niveles o tipos de manejos agronómicos y definir cuantitativamente las funciones que expliquen los factores responsables de

dichas diferencias (Woittiez et al., 2018), de tal manera de que identificada la causa de la brecha se tomen las decisiones pertinentes para que la producción alcance los rendimientos esperados.

Para poder estimar las brechas se deben calcular el rendimiento máximo alcanzable, el cual es el máximo beneficio del cultivo, sin limitaciones físicas (Vásquez et al., 2021), biológicas (Guamán et al., 2020) o económicas (Sainz et al., 2019) y con la aplicación de las mejores prácticas de manejo conocidas por un tiempo y en un agroecosistema dado; para estimar la brecha a su vez se debe calcular el rendimiento a nivel de finca, el cual es el rendimiento promedio de los agricultores en una determinada área seleccionada, en un momento y en una ecología determinada, en ambos casos para la brecha se estima mediante la diferencia entre el rendimiento máximo y el rendimiento promedio, para lo cual se emplean herramientas de estadísticas descriptivas.

Las brechas de rendimiento pueden ser explicada por dos factores el primero por la brecha entre el rendimiento potencial teórico y el rendimiento a nivel de estación experimental, para la cual los científicos conciben y desarrollan mejores variedades potenciales, el segundo por la diferencia entre el rendimiento de la estación experimental y el rendimiento agrícola potencial, y es causado principalmente por los factores que generalmente son intransferibles, como las condiciones ambientales y algunas tecnologías de componentes incorporados que están disponibles en las estaciones de investigación (Bonatti et al., 2014).

Las causas de las brechas de rendimiento pueden ser de índole agronómico como el manejo de riego (Rabery et al., 2020), fertilización (Gudelj y Juárez, 2019), control de plagas y enfermedad (Mejía, 2018), pero también pueden deberse a condiciones climáticas (González et al., 2020) y edáficas (Boccolini et al., 2019) que predicen que a pesar de que material genético puede alcanzar rendimientos extraordinarios, el mismo solo lo alcanza en aquellas regiones donde las condiciones edafoclimáticas son las más adecuadas.

En este sentido los factores que causan brechas de rendimiento pueden clasificarse según su modalidad y el grado en el cual contribuyen a las brechas: **Biofísicos:** clima/condiciones atmosféricas, suelos, agua, presión por plagas, malezas; **Técnicos/manejo:** labranza, selección de variedades/semillas, agua, nutrientes, malezas, plagas y manejo en postcosecha; **Socioeconómicos:** nivel socioeconómico, tradiciones y conocimientos de los agricultores, tamaños de la familia, ingresos/gastos/inversiones del hogar; **Institucionales/políticos:** política del gobierno, precios del arroz, crédito, oferta de insumos, tenencia de la tierra, mercado, investigación, desarrollo, extensión y de **transferencia de tecnología** como: idoneidad y servicios del personal de extensión;

integración entre investigación, desarrollo y extensión; resistencia de los agricultores frente a la nueva tecnología; conocimientos y habilidades; vínculos débiles entre el personal de extensión de los sectores público, privado y no gubernamental.

Para estimar el porcentaje que representa cada brecha en primer lugar se debe identificar cual es la variable responsable y estimar el peso, para lo cual se ha utilizado un análisis de regresión múltiple, donde las variables que resulten estadísticamente significativas se consideran como causante de la brecha, dado que uno de los problemas que se presentan en la estimación de este tipo de análisis de la variabilidad en especial cuando se trabaja con una gran cantidad de parámetros en periodos cortos de tiempo se ha recurrido a la estadística multivariada, predominante el uso de Análisis de Componentes Principales (ACP), al cual ha sido una herramienta a útil, para identificar en este caso las variables asociadas a la cambios en el rendimiento.

Las brechas de rendimiento ocurren en todos los cultivos, sin embargo la preocupación es mayor en aquellos rubros como el banano, el cual se ha hecho una alta inversión para la selección de nuevos materiales que aumente la producción del mismo en particular en el caso de los países tropicales como el Ecuador, donde este es uno del principales rubros de exportación, en el país aunque existen muchas regiones productoras, existe aquellas donde los rendimientos son superior por lo que de establecer si las causas de este es debido a condiciones ambientales o el manejo .

Para poder hacer este análisis tanto desde el punto de vista cuantitativo es necesario desarrollar algoritmo que la identificación de la brecha y que a su vez esta herramienta asa en la aplicación de diversos procedimientos estadísticos sea los suficientemente confiable para emplearla de forma rutinaria, por lo que el objetivo de esta investigación fue desarrollado un algoritmo para identificar las brechas de rendimientos en el cultivo del banano, el cual es principal rubro exportador del Ecuador.

Materiales y Métodos

Se trabajó con los de registros Sistema de Producción Agropecuario (SIPA) durante el periodo 2010 a 2020, para datos de producción (Tabla 1) y superficie de siembra en banano (Tabla 2) en las Provincias de Cotopaxi, Morona Santiago, Santa Elena, El Oro y Guayas. Los datos fueron depurados en función de la presencia de valores extremos y de aquellos datos que maximizan o

achican los valores de las respuestas predichas. Éstos últimos fueron eliminados luego de graficar los valores estimados contra los residuales.

Tabla 1. Datos de rendimiento (Tn ha⁻¹) de cinco provincias para el análisis de brecha de rendimiento en banano en el Ecuador

Año	Cotopaxi	Morona Santiago	Santa Elena	El Oro	Guayas
2010	27,68	SD	14,76	34,61	42,49
2011	22,51	SD	15,58	44,74	38,82
2012	25,76	5,07	4,41	36,13	39,37
2013	29,37	7,73	3,55	41,39	34,70
2014	13,69	1,98	25,49	31,43	45,06
2015	33,95	2,19	19,48	35,46	41,29
2016	34,26	5,9	36,32	34,18	37,68
2017	26,24	2,65	36,59	36,41	42,43
2018	34,49	8,59	50,05	39,95	43,46
2019	46,3	2,62	53,18	35,09	43,76
2020	26,19	3,92	2,06	25,4	43,84

Tabla 2. Datos de superficie (ha) sembrada de banano de cinco provincias para el análisis de brecha de rendimiento en banano en el Ecuador.

Año	Cotopaxi	Morona Santiago	Santa Elena	El Oro	Guayas
2010	3138	SD	171	57667	42299
2011	5535	SD	170	55163	45192
2012	4544	3162	72	63883	41775
2013	4507	1783	91	64094	41965
2014	3101	794	656	33711	37848
2015	5324	1223	250	39953	55197
2016	5813	724	1601	43416	42125
2017	6501	257	3271	45297	49183
2018	5098	159	1602	43046	46674
2019	2898	1080	1552	46069	39191
2020	4109	5,91	364	45213	50660

Para la identificación de las brechas de rendimiento se aplicó el algoritmo que se ilustra en la figura 1, en el cual el primer paso fue la creación de la base de datos, que incluyó variables climáticas y edáficas a partir del cual se realizó la estadística descriptiva, para posteriormente llevar a cabo el análisis de correlación de todas las variables con el rendimiento, seguido de una análisis de regresión para identificar la variable causante de la brecha para después hacer una análisis comprobatorio mediante un ACP.



Figura 1. Algoritmo para estimar las brechas de rendimientos en el cultivo del banano

Para la identificación de la brecha de rendimientos se consideraron como variable dependiente el rendimiento y como independiente además de la superficie de siembra algunos parámetros climáticos y edáficos que se describen a continuación.

Rendimiento del cultivo: expresado en la cantidad de toneladas producidas por superficie cosechada, se consideraron los datos del sistema de información agropecuaria de Ecuador para el periodo 2010-2020.

Superficie de siembra: se consideraron las hectáreas sembradas con banano en las cinco provincias evaluadas en el estudio, independientemente de la variedad, se consideraron los datos del sistema de información agropecuaria de Ecuador para el periodo 2010-2020.

Precipitación: Se refiere a los datos promedio anual de lluvia para el periodo bajo estudio, los valores se expresaron en mm y se tomaron como referencia los valores promedios de las estaciones climatológicas dentro del área de influencia de cada provincia.

Temperatura: se refiere a los datos de temperatura promedio anual para el periodo bajo estudio, se expresaron en grados centígrados se tomaron como referencia los valores promedios de las

estaciones climatológicas dentro del área de influencia de cada provincia, las estaciones climatológicas usadas en el estudio se detallan en la tabla 3.

Tabla 3. Estaciones climatológicas consideradas para la determinación de temperatura y precipitación en 5 provincias ecuatorianas productoras de banano.

Provincia	Estaciones climatológicas
Cotopaxi	M0124
Morona Santiago	M1040
Santa Elena	M1170
El Oro	M1246
Guayas	M1207

Fuente: INAMHI (2022).

Materia orgánica: se refiere al contenido de carbono orgánico en el suelo, los datos fueron obtenidos en artículos científicos y trabajo de grado en repositorio de investigaciones realizadas en las provincias bajo estudio, se consideró el contenido de materia orgánica en los primeros 20 centímetros de suelo y obtenidos por la metodología de Walkley and Black (1934) y se expresó en g kg^{-1} .

pH: es un valor que mide el grado de acidez o alcalinidad del suelo, los datos fueron obtenidos en artículos científicos y trabajo de grado en repositorio de investigaciones realizadas en las provincias bajo estudio, se consideró el pH en los primeros 20 centímetros de suelo, determinado por método potenciométrico en relación agua suelo 5:1.

Conductividad eléctrica es un valor que mide el grado de salinidad del suelo, los datos fueron obtenidos en artículos científicos y trabajo de grado en repositorio de investigaciones realizadas en las provincias bajo estudio, se consideró la conductividad eléctrica en los primeros 20 centímetros de suelo, determinado por medio de conductímetro en relación agua suelo 5:1 y se expresó en dS m^{-1} .

Contenido de fósforo (kg ha^{-1}): se refiere al contenido de fósforo en el suelo en forma de P_2O_5 , los datos fueron obtenidos en artículos científicos y trabajo de grado en repositorio de investigaciones realizadas en las provincias bajo estudio, se consideró el contenido de fósforo en los primeros 20 centímetros de suelo y obtenidos por la metodología de Olsen.

Contenido de potasio (kg ha^{-1}) se refiere al contenido de potasio en el suelo en forma de K_2O , los datos fueron obtenidos en artículos científicos y trabajo de grado en repositorio de investigaciones

realizadas en las provincias bajo estudio, se consideró el contenido de potasio en los primeros 20 centímetros de suelo y obtenidos por la metodología de extracción en acetato de amonio o cloruro de amonio, cuantificación por absorción atómica.

Control de calidad de datos

Para la aplicación del algoritmo se siguen una serie de pasos posterior a la construcción de los datos, en primer lugar, se aplicó un control de calidad de los datos de rendimiento de banano de las 5 provincias evaluadas que constituyendo 50 datos en total, el cual consistió en depurarlos eliminando datos extremos y datos atípicos, así como completando los datos faltantes. Los mismos, fueron subdivididos de acuerdo a la provincia en cinco grupos: Cotopaxi (10 datos), Morona Santiago (10 datos); Santa Elena (10 datos); El Oro (10 datos) y Guayas (10 datos).

Se realizó una prueba de normalidad, esta permite modelar los valores rendimiento en un histograma de frecuencias relativas, este presenta si una distribución de los valores de la variable dependiente es normal, la cual maximiza la visualización de la entropía entre todas las distribuciones con media y varianza conocidas.

Análisis estadístico descriptivo

Se llevó a cabo un análisis de estadística descriptiva (media, desviación estándar, varianza, coeficiente de variación, valores mínimos y máximos) para la variable independiente (rendimiento) y las variables dependientes (variables de manejo agronómico), para conocer los valores máximos, mínimo, promedio, así como la desviación de los datos.

Análisis de brecha de rendimiento

A los fines de cuantificar la relación entre las variables climáticas y de suelo (variables independientes) y el rendimiento de banano (variable dependiente) se realizó un análisis de regresión múltiple a pasos a partir del procedimiento PROC REG STEPWISE. Se trata de encontrar el (los) modelo(s) que mejor explique(n) cuáles variables tienen mayor efecto sobre el rendimiento y cuál es su grado de influencia sobre la brecha o diferencias en el rendimiento. Donde el rendimiento es la variable dependiente y las variables independientes relacionadas con las variables de clima y suelos correspondientes al periodo 2010-2020.

Identificación de variables limitantes del rendimiento

De la ecuación resultante del análisis de regresión múltiple paso a paso, se identificaron las variables responsables de la brecha de rendimiento las cuales se determinaron en función de la probabilidad obtenida la cual debió ser menor a ($p < 0,05$) y posteriormente se comprobó la

importancia de estas variables, mediante un análisis comprobatorio usando una técnica de análisis multivariado denominada análisis de componentes principales (ACP).

Análisis de componentes principales (ACP)

En este análisis se aplicó para conocer la relación entre los elementos de una población y se sospecha que en dicha relación influye de manera desconocida un conjunto de variables o propiedades de los elementos. Cada componente principal explica una proporción de la variabilidad total. El mismo se realizó con el objeto de conocer la relación entre las áreas de producción de banano y un conjunto de variables, relacionadas con las condiciones climáticas y de suelo, que pudieran ser las responsables de la diferencia o brecha del rendimiento entre dichas parcelas. Para el ACP se utilizó el InfoStat/L versión libre 2020. Los componentes principales fueron determinados a partir de la matriz de correlación debido a la diferencia en unidades de medición, magnitud y orden diferentes (Pla, 1986).

Resultados y Discusión

El primer resultado que se presenta es el relacionado a la estadística descriptiva de los datos correspondiente al periodo 2010-2020, donde se observa que en promedio los rendimientos fueron de 30,06 Tn ha⁻¹ con un valor máximo de 53,18 Tn ha⁻¹ lo que representa una brecha de 20,12 Tn ha⁻¹, observándose que las mayores variaciones que pueden explicar los cambios en el rendimiento fueron en la superficie sembrada, contenido de materia orgánica, CE y potasio disponible (Tabla 3).

Tabla 4. Estadística descriptiva de datos de producción de banano en 5 provincias del Ecuador, durante el periodo 2010-2020

Variable	N	Mínimos	Máximo	Promedio	DE	CV
Rendimiento	50	2,06	53,18	30,06	16,24	54,04
Superficie	50	5,91	50660	19436	21538	110,82
Precipitación	50	310	3099	1052,35	692,27	65,78
Temperatura	50	9,00	36,84	22,22	6,43	28,92
pH	50	4,91	8,20	6,48	0,99	15,32
MO	50	0,60	22,60	5,84	6,72	115,05
CE	50	0,05	8,90	1,82	2,69	147,97
P	50	1,20	105	25,77	24,21	93,93
K	50	4,30	812	168,07	204,48	121,55

En la figura 2, se observa que para alcanzar los valores máximos de producción que son de 53,18 Tn ha⁻¹ la producción nacional debe incrementarse en un 70 % lo que requiere además de mejorar considerablemente el nivel tecnológico de productores en función de aquellos considerados de elites, seleccionar las áreas con mejores condiciones edáficas y climáticas que garanticen una adecuada producción de banano por encima de los valores promedios obtenidos a nivel nacional.

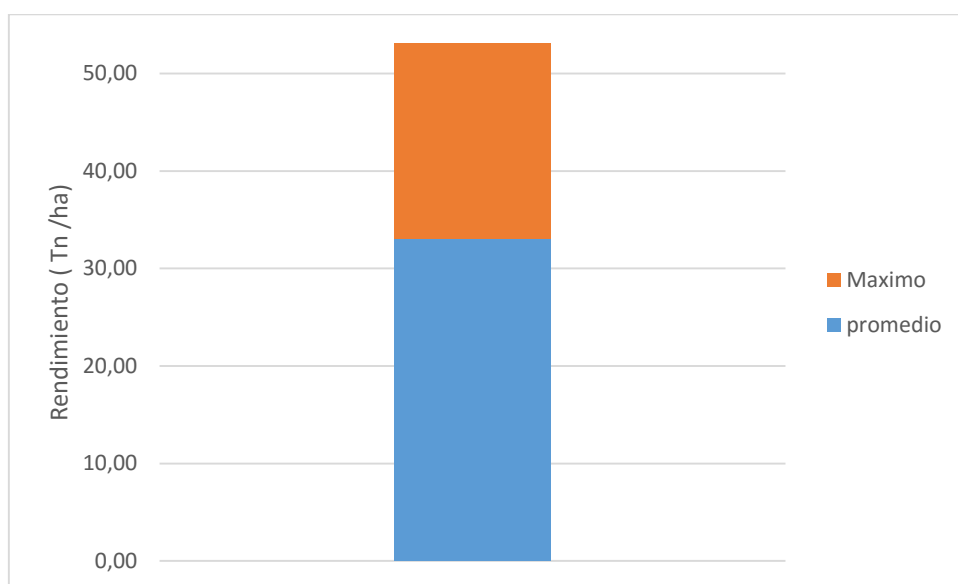


Figura 2. Brechas de rendimiento en la producción de banano en 5 provincias del Ecuador, durante el periodo 2010-2020.

Dada la importancia de seleccionar las áreas con mejores aptitudes para la producción de banano se compararon los datos de 5 provincias del Ecuador en las cuales los rendimientos son variables en función de cambios en las condiciones de clima y suelo encontrándose como se observa en la tabla 4, que las provincias de Guayas, Santa Elena y el Oro presentaron rendimientos superiores a los observados en la provincia de Morona Santiago (Tabla 4).

Tabla 5. Rendimiento de banano (Tn ha⁻¹) en 5 provincias del Ecuador, durante el periodo 2010-2020

Variable	N	Mínimos	Máximo	Promedio	DE	CV
Cotopaxi	10	26,19	46,30	33,50	8,24	24,60
Morona Santiago	10	2,62	8,59	4,74	2,53	53,52
Santa Elena	10	2,06	53,18	35,64	20,27	56,89
El Oro	10	25,40	39,95	34,21	5,39	15,76
Guayas	10	37,68	47,64	42,23	2,61	6,17

Con respecto a las brechas entre los rendimientos de banano a nivel de provincias en la figura 3 se puede observar que las menores se presentaron en aquellas provincias con mayores rendimientos debido quizás a un manejo más tecnificado y estandarizado, como fue en la provincia del Guayas la cual presento las menores brechas (20,60 %) seguida de la provincia de Santa Elena (33%), El Oro (35,68%) y Cotopaxi (37,01 %). Adicionalmente se observa que la mayor desigualdad se presenta en la provincia de Morona Santiago (91,11 %), que es aquella que tiene los rendimientos más bajos probablemente por tener las condiciones más desfavorables para la producción de banano, sistemas tecnológicos menos avanzado en comparación a las provincias restantes.

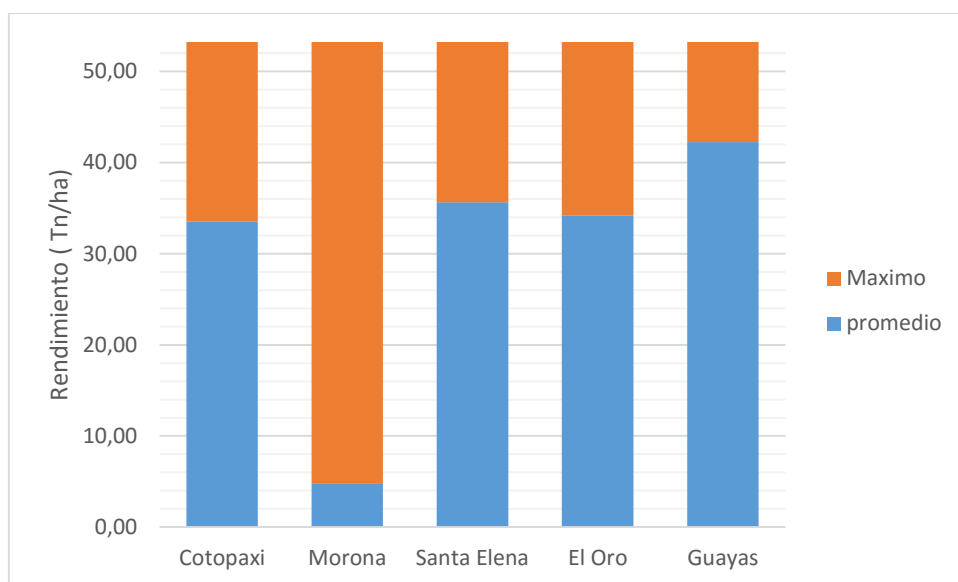


Figura 3. Brechas de rendimiento en la producción de banano en las provincias de Cotopaxi, Morona Santiago, Santa Elena, El Oro y Guayas durante el periodo 2010-2020.

Para explicar las brechas de rendimiento se realizó un análisis de regresión múltiple por paso (Stepwise) donde se encontró que las variables que explican las variaciones de rendimiento fueron el contenido de MO, la conductividad eléctrica y el contenido de P, quienes poseen coeficiente de regresión altamente significativo (Tabla 5).

Tabla 6. Variables predictoras que explican las brechas de rendimiento en la producción de banano en 5 provincias del Ecuador, durante el periodo 2010-2020

Variable	Coficiente	LI (95 %)	LS (95%)	Significancia
MO	-1,05	-1,84	-0,26	0,0117
CE	1,55	-0,24	3,34	0,0452
P	0,18	-0,04	0,40	0,0229

La disminución en los rendimientos por la reducción de la MO está asociada a que esta es una fuente importante para aportar nutrientes producto de la mineralización de la mismas bien sea producto de la acumulación natural de materia orgánica o por abonamiento como compost, microalgas u otro tipo de biofertilizantes, en el caso del P su contenido en el suelo, producto de una adecuada fertilización es un elemento clave para garantizar los rendimientos del banano y se relaciona con la conductividad eléctrica altos rendimientos con altos valores asociado a la capacidad de algunos materiales de banano de adaptan a condiciones de suelos afectados por sales.

La importancia de la materia orgánica en la producción de banano es concordante con lo reportado por Valverde et al. (2019) quien señala que la misma es una práctica necesaria para mantener la alta productividad del cultivo y evitar la degradación química y biológica del suelo, además de mejora la fertilidad de suelo por su aporte de nitrógeno y el potasio que son los dos elementos más importantes dentro de la producción bananera.

Con relación al P los resultados contradicen los reportados por Vivas-Cedeño et al. (2018), Quien observa que el efecto de la fertilización con este nutriente no influye directamente en el aumento o disminución de la producción por lo que el fósforo no tiene efecto en el rendimiento de la fruta del banano, dado que no presenta respuesta en su producción a la fertilización fosforada y las recomendaciones de aplicación, solo son para reposición de los minerales extraídos de la plantación.

Mendes et al. (2016), señalan que no de los principales problemas en el cultivo del banano, especialmente en regiones áridas y semiáridas, es la salinidad del suelo y del agua, ya que el cultivo muestra límites significativos en la producción cuando se cultiva bajo estrés salino. La especie se considera sensible a la salinidad por lo que requiere valores para la conductividad eléctrica (CE) del agua de riego de hasta 1,00 dS m⁻¹, no obstante, las provincias donde más se

produce banano en Ecuador como Guayas y El Oro, presentan una gran cantidad de suelos afectados por sales, por lo que la siembra de materiales tolerante a la salinidad es clave para mantener los rendimientos como parecer ser sugerido en los resultados obtenidos del análisis de regresión.

Para comprobar si estas variables verdaderamente explican la brecha entre los rendimientos esperados y los obtenidos en las 5 provincias del Ecuador, se realizó un análisis de componentes principales, donde se observa que el 72 % de la variación de estos datos es explicado por los componentes 1 y 2, por lo que se decidió estudiar el comportamiento de estas variables en esos dos componentes a partir de sus correlación con el mismo y la distribución de los grupos y dirección de los vectores en el biplots (Tabla 6).

Tabla 7. Componentes principales (valores de Eigen) para las variables evaluadas en 5 provincias ecuatorianas dedicadas a la producción de banano.

Lamda	Valor	Proporción	Proporción acumulada
1	4,86	0,54	0,54
2	2,53	0,28	0,72
3	1,28	0,14	0,96
4	0,33	0,04	100

Cuando se analiza al correlación de cada variable con cada uno de los componentes en el componente 1 se observa que las más importante en explica los cambios en los rendimientos son la temperatura, el pH y el contenido de P, las cuales además de tener una alta correlación el componente tiene la misma dirección que el vector de rendimiento como se observa en la Figura 2, así mismo en el componente 2 se observa que la CE, y el contenido de K tienes las correlación más alta con este componente por lo cual, también contribuyen a explicar las brechas de rendimiento en función de ello se ratifica la CE y el P como variable en explicar los mayores rendimientos pero no así la MO que a pesar de tener una alta correlación con el componente la dirección del vector es contraria a la del rendimiento, adicionalmente a estas variables el análisis de componentes principales permitió determinar que la temperatura y el pH son valores asociada a los altos rendimientos, las cuales no fueron seleccionados por el análisis de regresión (Tabla7).

Tabla 8. Correlación de variables evaluadas con los componentes principales, para la selección de los parámetros que explican los cambios en el rendimiento de banano en 5 provincias ecuatorianas.

Variable	Componente 1	Componente 2
Superficie	-0,62	-0,42
Precipitación	0,69	0,72
Temperatura	-0,91	0,09
pH	-0,89	0,05
MO	0,93	-0,04
CE	-0,25	0,90
P	-0,83	0,16
K	-0,50	-0,87

Los resultados observados son ratificados en el biplot del componente 1 vs componente 2, donde se observan dos grandes grupos la zona de Guayas, el Oro y Santa Elena, asociadas a rendimientos altos de banano y la zona de Cotopaxi y Morona Santiago con rendimientos más bajos, los altos rendimientos de las provincias de Guayas, el Oro y Santa Elena esta asociadas a mejores condiciones climáticas con temperaturas más altas, pH cercano a la neutralidad, suelos con alto contenido de P y K, así como variables tolerantes a condiciones de suelo afectados por sales como los que predominan en al provincias de Guayas (Figura 4).

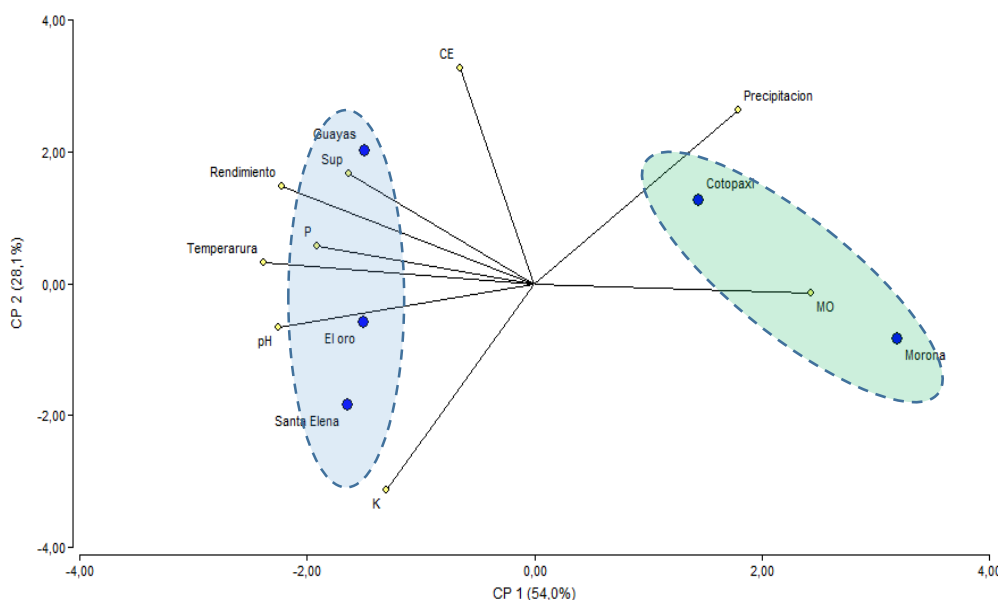


Figura 4. Dispersión de las variables evaluadas con los dos primeros componentes que explican el rendimiento de banano en 5 provincias ecuatorianas.

La primera variable que pude explicar la brecha de rendimiento y que fue identificada en el análisis complementario por ACP mas no en el análisis de regresión múltiple fue la temperatura, esto coincide con lo reportado en diversas investigaciones donde la aptitud agroecológica del cultivo de banano se ve favorecido en regiones de altas temperaturas como las de Guayas, El Oro, Santa Elena, tal como se ha reportado en diversas investigaciones (Ravi y Vaganan, 2016) sin embargo un factor que puede estar influenciado es el cambio climático y aunque no se analizó desde esta perspectiva en los datos presentados se evidencia cambios notables en los rendimientos anuales lo que pueden estar correlacionados a las variaciones de temperatura y régimen de precipitación (Verzosa et al., 2016).

Un segundo factor es el pH, observándose mayores rendimientos en suelos con valores de pH más altos, debido a que esto favorece una mayor disponibilidad de nutrientes (Escobar et al., 2020), por el contrario pH bajos que predominan en aquellas provincias donde existen altas precipitaciones y problemas de erosión, que favorece el lavado de bases (Pérez, 2019), pueden conllevar la presencia de suelos ácidos que limitan el desarrollo del cultivo por problemas para la absorción de nutrientes (Naranjo-Morán et al., 2021), fijación de P (García et al., 2019) y toxicidad por aluminio (Sancho y Molina, 2016).

Villaseñor et al. (2020) señalan que el banano (*Musa spp.*) es conocido por su alta demanda de nutrientes, entre ellos el potasio (K). Un suministro adecuado de este elemento nutricional es muy importante para optimizar el equilibrio económico/productivo del cultivo, siendo una característica nutricional del cultivo, corresponde a su exigencia de potasio (K), superior a otros nutrimentos como nitrógeno (N), calcio (Ca), magnesio (Mg) y fósforo (P) (Rodríguez et al., 2021). En este contexto, el potasio es esencial para una producción sostenible, por lo tanto, la mayoría de trabajos relacionados con el potasio se han desarrollado en función de la determinación de una dosis óptima de fertilización (DOF), por medio de modelos estadísticos que explican la incidencia de la fertilización sobre el rendimiento (Sala y Boldea, 2011).

Con respecto al P si bien se considera que el mismo no es tan importante para la producción del banano como es el caso del K, su presencia en el suelo, bien sea de forma natural o mediante fertilización es clave para garantizar un adecuada desarrollo del cultivo, dado que el P está asociado a procesos de división celular, desarrollo de raíces (Novoa et al., 2018) y propagación de plantas, en este caso se observó que en las provincias de mayor rendimiento

los suelos poseen alto contenido de P, asociados a la fertilización orgánica o inorgánica del cultivo (Jaramillo, 2021).

Otra variable que se encuentra asociada a los altos rendimiento del cultivo y cuyos resultados coinciden con las identificación de brechas mediante el análisis de regresión fue la conductividad eléctrica, lo que ratifica la importancia de seleccionar variedades tolerantes a condiciones de salinidad, dado que en las provincias de mayores rendimiento, si bien las condiciones edafoclimáticas son la más apropiadas, lo literatura reporta severo problemas de sales, lo que afecta la producción del cultivo de banano el cual es altamente sensible a la presencia de sales en el suelo (Medina, 2019).

Como se observó el algoritmo empleado permitió identificar las brecha que limitan la producción de banano en las principales provincia del Ecuador, lo que servirá como herramienta para llevar a cabo prácticas de manejo que reduzcan a mismas, los dos análisis estadístico coincidieron en reportar la CE y el P como parámetros claves en explicar las brechas, sin embargo el ACP permitió identificar otros parámetros como la temperatura el pH y el contenido de observándose solo una identificación errónea en la MO como parámetros para explicar las diferencias en los rendimientos.

El uso de métodos estadísticos y matemáticos para estudiar los factores que afectan el rendimiento del banano han sido señalados por Bencomo y Suazo (2021) quienes afirman que para establecer valoraciones, estudios retrospectivos y conocer la evolución y tendencias de la producción y comercialización de bananos, es imprescindible la correcta identificación y tratamiento de los indicadores que miden este proceso y permiten evaluar el comportamiento de los indicadores de estudio y monitorear los cambios del entorno, utilizando la metodología del Análisis Exploratorio de Datos o Exploratory Data Análisis (EDA), por ser más convenientes, de acuerdo al grado de dispersión de los datos, los índices de posición (cuartiles) a través de las Bisagras de Tuckey y correlaciones calculadas para determinar el grado de dependencia de cada variable del estudio y su significación estadística

El procedimiento empleado para el desarrollo del algoritmo si bien recoge algunos elementos de estas investigación se usó con éxito en el cultivo del banano, tiene la ventaja que lo aborda de una manera integral mediante el uso de datos de diferentes provincias con marcados cambio en el rendimiento producto de las variaciones en sus condiciones edafoclimáticas, la ventaja

es que para la base de datos se usó un grupo más amplio de información, lo cual debería ayudar a disminuir la dispersión de los datos que es típica en estudios ambientales y agrícolas.

Si bien este algoritmo es una primera aproximación, se tiene la ventaja de que en el Ecuador se posee una red amplia de información, la cual se puede ir alimentando con nuevos elementos que contribuyan a una explicación más detallada de las brechas de rendimiento, comprobando además de los elementos edafoclimáticos, elementos el manejo agronómico que facilitarían a comprensión de los procesos que explican las brechas rendimiento, en aras de optimizar el manejo agronómico, para aumentar la producción de banano, que es el principal rubro de exportación del Ecuador.

Conclusiones

Se observaron marcadas brechas entre el rendimiento del banano observado en las provincias de Guayas, Oro, Sana Elena en comparación a los rendimientos de banano en Cotopaxi y Morona Santiago, cuyas diferencias se deben a variaciones climáticas y de suelo, que se asocian a mayores rendimientos en las provincias con mejores condiciones climáticas y edáfica, sin embargo es importante resaltar que en este estudio no se consideraron los cambios debidos al cambio climático y a condiciones edáficas inadecuadas de origen antrópica, generadas por el inadecuado manejo de la tierra.

El uso de los procedimientos estadísticos como la regresión múltiple (Stepwise) complementada con análisis de componentes principales (ACP) resulto eficiente para la identificación de las variables responsables de la brecha de rendimiento, cuya aplicación e pude extender a otros rubros de importancia agronómica en el Ecuador y donde las causas de las brechas de rendimientos se deben a variaciones edafoclimática, sino a cambios en la calidad de los recursos biofísicos producto de las condiciones de manejo o a factores externos que afecten el manejo de la tierra.

Para consolidar este procedimiento como herramienta rutinaria en el análisis de brechas de rendimientos se debe contar con una base de datos robusta, si bien el Ecuador presenta una amplia información en materia de productividad y rendimiento en la mayoría de los rubros, así como una amplia red climática, carece de una información sistemática en lo referente a información de fertilización, calidad de suelo y riego, por lo cual se debe fortalecer este

aspecto para optimizar una base de datos de calidad que alimente el sistema de estimación de brechas de rendimiento.

Referencias

1. Bencomo, O. B. B., & Suazo, V. G. (2021). Comportamiento de indicadores de calidad en el cultivo del banano de la provincia El Oro, Ecuador. *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas*, 4(S1), 202-209.
2. Boccolini, M., Cazorla, C. R., Galantini, J. A., Belluccini, P. A., & Baigorria, T. (2019). Cultivos de cobertura disminuyen el impacto ambiental mejorando propiedades biológicas del suelo y el rendimiento de los cultivos. *RIA. Revista de investigaciones agropecuarias*, 45(3), 412-425. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1669-23142019000300412
3. Bonatti, R., Calvo, S., Giancola, S., Centeno, M., Iacovino, R., & Jaido, A. M. (2014). Análisis cualitativo de los factores que afectan a la adopción de tecnología en los cultivos de soja y maíz de la provincia de San Luis. Serie: estudios socioeconómicos de la adopción de tecnología, (6). Ediciones INTA, https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-analisis_cualitativo_adopcion_san_luis_inta.pdf
4. Escobar, M. I., Panadero, A. N., Medina, C. A., Álvarez, J. D. C., Tenjo, A. I., & Sandoval, L. M. B. (2020). Efecto de prácticas agroecológicas sobre características del suelo en un sistema de lechería especializada del trópico alto colombiano. *Development*, 32, 4. <https://lrrd.cipav.org.co/lrrd32/4/maria.es32058.html>
5. García Guzmán, S. D., Bautista-Montealegre, L. G., & Bolaños-Benavides, M. M. (2019). Diagnóstico de la fertilidad de los suelos de cuatro municipios de Cundinamarca (Colombia) para la producción de plátano. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 22(1). <https://doi.org/10.31910/rudca.v22.n1.2019.1192>
6. González Osorio, B. B., Barragán Monroy, R., Simba Ochoa, L., & Rivero Herrada, M. (2020). Influencia de las variables climáticas en el rendimiento de cultivos transitorios en la provincia Los Ríos, Ecuador. *Centro Agrícola*, 47(4), 54-64. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0253-57852020000400054

7. Guamán Guamán, R. N., Desiderio Vera, T. X., Villavicencio Abril, Á. F., Ulloa Cortázar, S. M., & Romero Salguero, E. J. (2020). Evaluación del desarrollo y rendimiento del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) utilizando cuatro híbridos. *Siembra*, 7(2), 47-56. <https://doi.org/https://doi.org/10.29166/siembra.v7i2.2196>
8. Gudelj, V., & Juárez, I. M. (2019). Fertilización y brecha de rendimiento del cultivo de maíz. Informe de Actualización Técnico en línea N° 14 – agosto 2019, 43-45. Ediciones INTA. https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_marcosjuarez_actualizacionmaiz_2019.pdf#page=43
9. INAMHI. (2022). Red de estaciones automáticas hidrometeorológicas. <http://186.42.174.236/InamhiEmas/>
10. Jaramillo, J. (2021). Efecto de nitrógeno, fosforo y potasio más tierra de diatomea en el cultivo de plátano (*Musa aab*), cantón milagro, provincia del Guayas. Trabajo de Grado. Universidad Agraria Del Ecuador. Milagro - Ecuador <http://181.198.35.98/Archivos/JARAMILLO%20QUNDE%20CARLOS%20JAVIER.pdf>
11. Medina, E. (2019). Estudios de suelos, nutrición y fertilización en varias zonas bananeras del Ecuador. In X Congreso Ecuatoriano de La Ciencia Del Suelo (Vol. 14). <http://www.secsuelo.org/wp-content/uploads/2015/06/8.-Estudios-de-Suelos.pdf>
12. Mejía, K. J. (2018). Efecto de bioplaguicidas sobre la incidencia de plagas y enfermedades foliares y componentes de rendimiento del frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) en Santa Rosa de Copán. *Revista Ciencia y Tecnología*, 58-73. <https://www.lamjol.info/index.php/RCT/article/view/6439>
13. Mendes Almeida, A. M., Gomes, V. F. F., Mendes Filho, P. F., Lacerda, C. F. D., & Freitas, E. D. (2016). Influence of salinity on the development of the banana colonised by arbuscular mycorrhizal fungi. *Revista Ciência Agronômica*, 47, 421-428. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20160051>
14. Naranjo-Morán, J., Vera-Morales, M., & Mora-González, A. (2021). Acumulaciones de hierro en agroecosistemas bananeros (Milagro, Ecuador): Una revisión bibliográfica de algunos factores que intervienen en la salud y nutrición del cultivo. *Siembra*, 8(2). <https://doi.org/https://doi.org/10.29166/siembra.v8i2.2680>
15. Novoa, M. A., Miranda, D., & Melgarejo, L. (2018). Efecto de las deficiencias y excesos de fósforo, potasio y boro en la fisiología y el crecimiento de plantas de aguacate (*Persea*

- americana, cv. Hass). *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 12(2), 293-307.
<https://doi.org/10.17584/rcch.2018v12i2.8092>
16. Pérez Molina, A. (2019). Riesgo de sodicidad en los suelos de Cantón Milagro, Guayas-Ecuador en época de estiaje. *Revista Politécnica*, 42(2), 15-22.
http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1390-01292019000100015
 17. Pla, L. E. (1986). *Análisis multivariado: método de componentes principales* (No. 519.535 P696). OEA, Washington, DC (EUA). Secretaría General. Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico.
 18. Rabery, S. H., Cano, V. E., Ibars, R. F., & Lezcano, J. R. (2020). Incidencia del riego complementario en el rendimiento de granos de sésamo (*Sesamun indicum* L.). *Investigación Agraria*, 22(2), 75-81. <http://dx.doi.org/10.18004/investig.agrar.2020.diciembre.2202642>
 19. Ravi, I., & Vaganan, M. M. (2016). Abiotic stress tolerance in banana. In *Abiotic stress physiology of horticultural crops* (pp. 207-222). Springer, New Delhi.
 20. Rodrigues Filho, V. A., Neves, J. C. L., Donato, S. L. R., & Guimarães, B. V. C. (2021). Potential nutrient-response curves and sufficiency ranges for 'Prata-Anã' banana cultivated under two environmental conditions. *Scientia Agricola*, 78. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2020-0158>
 21. Sainz Rozas, H., Reussi Calvo, N. I., & Barbieri, P. A. (2019). Uso del índice de verdor para determinar la dosis óptima económica de nitrógeno en maíz. *Ciencia del suelo*, 37(2), 246-256.
http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1850-20672019000200005&script=sci_arttext&tlng=en
 22. Sala, F., & Boldea, M. (2011, September). On the optimization of the doses of chemical fertilizers for crops. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1389, No. 1, pp. 1297-1300). American Institute of Physics. <https://doi.org/10.1063/1.3637856>
 23. Sancho, H., & Molina, E. (2016). Efecto del Mg y pH en la reducción de la toxicidad de Al en plantas de banano cultivadas en solución hidropónica. *Siembra*, 3(1), 53-66.
<https://doi.org/10.29166/siembra.v3i1.260>
 24. Valverde Luna, M. E. (2019). "Manejo y prevención de Sigatoka negra (*Mycosphaerella fijiensis*) en el cultivo de banano, en la hacienda Banaloli 1, zona de Babahoyo. Trabajo de Grado. Universidad Técnica de Babahoyo: Babahoyo, Ecuador.

- <http://dspace.utb.edu.ec/bitstream/handle/49000/6149/E-UTB-FACIAG-ING%20AGRON-000148.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
25. Vásconez, G. H., Caicedo, L., Zamora, D. V. V., & Mora, F. D. S. (2021). Producción de biomasa en cultivos de maíz: Zona central de la costa de Ecuador. *Revista de ciencias sociales*, 27(3), 417-431. <https://produccioncientificaluz.org/index.php/rcs/index>
 26. Verzosa, K. V. C., Gallegos, J. D. J. A., Jaramillo, F. Y. V., & Romero, A. E. L. (2016). Análisis económico del sector bananero y su relación con El Niño Oscilación del Sur (ENOS) en la provincia de El Oro (2001-2014). *Revista Tecnológica-ESPOL*, 29(2). <http://200.10.147.88/index.php/tecnologica/article/download/569/351>
 27. Villaseñor, D., Noblecilla-Romero, Y., Luna-Romero, E., Molero-Naveda, R., Barrezueta-Unda, S., Huarquilla-Henriquez, W., ... & Garzón-Montealegre, J. (2020). Respuesta óptima económica de la fertilización potásica sobre variables productivas del banano (*Musa spp.*). *Chilean journal of agricultural & animal sciences*, 36(2), 161-170. <http://dx.doi.org/10.29393/chjaas36-14rodv80014>
 28. Vivas-Cedeño, J. S., Robles-García, J. O., González-Ramírez, I., Álava-Cruz, D. A., & Meza-Loor, M. A. (2018). Fertilización del plátano con nitrógeno, fósforo y potasio en cultivo establecido. *Dominio de las Ciencias*, 4(1), 633-647. <https://dx.doi.org/10.23857/dom.cien.pocaip.2017.4.1.enero.633-647>
 29. Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*, 37(1), 29-38.
 30. Woittiez, L. S., van Wijk, M. T., Slingerland, M., van Noordwijk, M., & Giller, K. E. (2018). Brechas de rendimiento en el cultivo de palma de aceite: una revisión cuantitativa de factores determinantes. *Revista Palmas*, 39(1), 16-68. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/12400>