



Journal_{of the faculty of} Agricultural Sciences

AGRO-ECOLÓGICA

ISSN 2313-2906 (Digital)

Volumen 4-Número 2, diciembre 2025

AGRO-ECOLÓGICA publicada por primera vez en 2014, es una revista semestral editada por la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Mayor Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca (USFX). Este número digital, recoge los resultados de diferentes pesquisas realizados por investigadores nacionales e internacionales.

La revista publica artículos originales notas y ensayos sobre agricultura sostenible y la biodiversidad con énfasis en Chuquisaca, Bolivia y países vecinos, arbitrados mínimo por dos evaluadores externos y uno interno. Incluye temas relativos a agricultura, ecología, biología, conservación, manejo de recursos y uso de la biodiversidad.

Directorio de la revista

Walter Arízaga Cervantes: Rector-USFX
Erick Mita Arancibia: Vicerrector-USFX
Jorge Ronald Alurralde Saavedra: Decano - FCA

Vladimir Gutiérrez Mercado: Coordinador de Carreras Ingeniería Agronómica, Recursos Naturales y Desarrollo Rural

Oscar Vera Fernández: Director de Carrera Agronomía Técnico Superior

Martha Serrano Pacheco: Editora
Instituto de Agroecología y Seguridad Alimentaria

Winder Felípez Chiri: Editor-científico
Instituto de Agroecología y Seguridad Alimentaria

Reinado Lozano Ajata: Co-editor
Instituto de Agroecología y Seguridad Alimentaria

Jéssica Serrano Pasquier: Asistente de edición, maquetación y corrección
Asociada al Instituto de Agroecología y Seguridad Alimentaria

Adán Cortez Reyes y Jhon Milton Escobar Saavedra: Manejo base de datos
Instituto Tecnológico Boliviano Alemán

Editores Asociados

Tommy Dalgaard, Aarhus University, Dinamarca.

David Luciano Rosalen, Universidade Estadual Paulista, Brasil

Georgina Catacora, Universidad Católica, Bolivia.

Per Kudzk, Aarhus University, Dinamarca.

Editores de Sección Internacional

Alice Peña, Universidad del Este, Paraguay.

Daysi Ramirez, Universidad del Este, Paraguay.

Eloy Fernandez, Czech University of Life Sciences Prague, República Checa.

Francisco Pastor, Instituto Nacional Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, México.

Jennifer Villavicencio, Universidad Científica del Sur, Perú.

Marianela Conce, Instituto Dominicano de Investigación Agropecuaria, Republica Dominicana.

Mario Chacón León, CATIE, Costa Rica.

Paola Mariela Studer, Universidad Nacional de Cuyo, Argentina.

Patricia Novo, Universidad Nacional del Este, Argentina.

Stephanie Frischie, The Xerces Society for Invertebrate Conservation, EE.UU.

Zorayda Montalvo Avendaño: Diseño de
portadas
*Instituto de Agroecología y Seguridad
Alimentaria*

Todos los derechos reservados
ISSN: 2313-2906
Depósito legal: 3-3-66-15 P.O.

Editores de Sección, Nacionales

Carola Antezana, *Universidad Mayor de San
Simón, Bolivia.*

Ceferino Peca, *Universidad Autónoma Tomas
Frías, Bolivia.*

Cresencio Calle, *PROINPA, Bolivia.*

Edwin Machaca Mamani, *Universidad Mayor
de San Andrés, Bolivia.*

Isabel Llimachi, *Cooperación Técnica Alemana -
GIZ, Bolivia.*

Información: Instituto de Agroecología y Seguridad
Alimentaria (IASA)
Casilla 1046, Correo Central, Sucre Bolivia
Telf. (591) 464 31004/ Fax (591) 464 55653
agro-ecologica@usfx.bo iasa.fca@usfx.bo
<https://revistas.usfx.bo>
Sucre, Bolivia

Revista AGRO-ECOLÓGICA

Diciembre 2025, Vol. 4 Núm. 2

CONTENIDO

Editorial

La leche de cabra, una opción viable para combatir la desnutrición en algunas regiones de América Latina
Francisco Javier Pastor López..... 1

Artículos Originales

Dinámica de productos ecológicos frescos y su aporte a la seguridad alimentaria en Sucre
Shamir Abujder..... 3

Distribución espacial de las zonas potenciales de Recarga Hídrica en Bolivia
Neftalí Chapi Siñani, Paola Alejandra Padilla Medina & Beatriz Liboria Canaviri Blanco..... 14

Artículos Revisión

Desmitificando el uso de polvo de roca para la agricultura: un estudio de caso en Brasil
Cristiano De Angelis..... 26

Editorial

La leche de cabra, una opción viable para combatir la desnutrición en algunas regiones de América Latina

Goat's milk, a viable option to address malnutrition in some regions of Latin America

Francisco Javier Pastor López^{1*}

*Autor de Correspondencia: mvzpastor@gmail.com

¹ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Blvd. José Santos Valdés #1200, C.P. 27440. Matamoros, Coahuila, México.

Recibido: 20/08/2025 Aceptado para publicación: 02/12/2025

Sr. Editor:

Según la Organización Panamericana de la Salud, alrededor de 131.3 millones de personas en América Latina y el Caribe carecen de los recursos necesarios para acceder a una nutrición adecuada (OPS, 2023). Frente a este reto, la OPS sugiere que, para facilitar el acceso a dietas saludables, es imprescindible establecer incentivos para diversificar la producción de alimentos nutritivos, centrándose principalmente en la agricultura familiar y en los productores.

En este contexto, se sugiere la crianza de cabras como una opción viable para las personas que viven en áreas rurales con el fin de obtener leche. La cabra (*Capra hircus*) es conocida por ser un animal tranquilo y que se adapta bien a entornos secos donde otros animales no pueden sobrevivir; adicionalmente, estos animales utilizan tanto la vegetación nativa como la que se cultiva, y su estiércol mejora la calidad del suelo, sirviendo como un sustituto de fertilizantes químicos (Benavides et al., 1994), lo que es especialmente beneficioso para los agricultores en zonas alejadas. Además, según Geldsetzer-Mendoza y Riveros (2023), esta especie es notable por su capacidad para soportar el cambio climático, ya que puede seguir produciendo leche incluso bajo condiciones difíciles relacionadas con la alimentación y la falta de agua. Esto la hace muy importante para la seguridad alimentaria, sobre todo en comunidades de bajos ingresos y entre pequeños productores en naciones en desarrollo.

En cuanto a la relevancia nutricional de la leche, recientemente un grupo de médicos gastroenterólogos discutió en un comité especializado su contribución a la nutrición humana. En dicha reunión, se identificó que la leche de vaca (la cual fue objeto de análisis por ser la más consumida a escala nacional e internacional) es un alimento que proporciona una cantidad significativa de nutrientes de alta biodisponibilidad (ver Figura 1), así como macronutrientes y micronutrientes. Sin

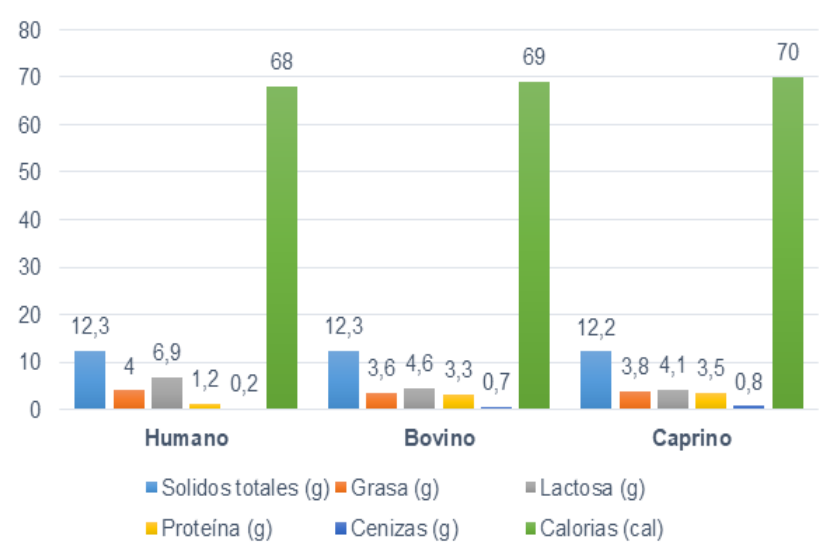


Figura 1. Composición media de la leche de humanos, bovinos y caprinos (ALKaisy et al., 2023).

embargo, algunas personas pueden experimentar problemas gastrointestinales como resultado de la intolerancia a la lactosa o la alergia a las proteínas de este tipo de leche (Uscanga-Domínguez et al., 2019).

En cambio, estos problemas tienden a disminuir o no manifestarse al consumir leche de cabra, gracias a su distinto perfil nutricional, lo que facilita su digestión y presenta un porcentaje bajo de lactosa. Este porcentaje, según Chacón (2005), es entre un 1 y 13% inferior al de la leche de vaca, e incluso hasta un 41% menor que el de la leche humana, lo que le favorece su tolerancia por algunos consumidores. En cuanto al aporte de minerales, aporta más que la leche de vaca, destacando en: calcio, fósforo, magnesio, potasio, cloro y azufre (Álvarez-Figueroa et al., 2022; ALKaisy et al., 2023; Zeña-Chiara et al., 2023). Chacón (2005) señala que, en algunos grupos de consumidores con demandas diarias altas de calcio y magnesio, como las mujeres embarazadas y amamantando, sus requerimientos se cubren con tres tazas de leche de vaca, mientras que la leche de cabra satisface estas necesidades con únicamente dos porciones de igual tamaño. Respecto a las proteínas presentes en la leche de cabra, ALKaisy et al. (2023) indican que tienen menores cantidades de α -s1-caseína, que es la proteína responsable de la mayoría de las reacciones alérgicas relacionadas con la leche de vaca.

Así, la leche de cabra ofrece un valor nutricional que no ha sido adecuadamente valorado por las poblaciones de América Latina, apareciendo como una opción viable para la dieta de familias rurales que carecen de medios o no tienen acceso a mercados tradicionales. De este modo, al criar cabras, una familia puede contar con un alimento rico en proteínas y minerales que contribuye a mejorar su nutrición. Por todo lo descrito anteriormente, se recomienda la cría de cabras para la producción de leche.

Referencias

- ALKaisy, Q. H., Al-Saadi, J. S., Al-Rikabi, A. K. J., Altemimi, A. B., Hesarinejad, M. A., & Abedelmaksoud, T. G. (2023). Exploring the health benefits and functional properties of goat milk proteins. *Food Science & Nutrition*, 11(10), 5641–5656. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3531>
- Álvarez-Figueroa, M. L., Pineda-Castro, M. L., Chacón-Villalobos, A., & Cubero-Castillo, E. (2022). Physicochemical and sensory characteristics of whole, skimmed and lactose-free goat and bovine milks. *Agronomía Mesoamericana*, 33(2), 47039. <https://doi.org/10.15517/am.v33i2.47039>
- Benavides, J. E., Lachaux, M., & Fuentes, M. (1994). Efecto de la aplicación de estiércol de cabra en el suelo sobre la calidad y producción de biomasa de morera (*Morus sp.*). *Árboles y arbustos forrajeros en América Central*, 2, 495-514. <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/A50-8516-p308.pdf>
- Chacón Villalobos, A. (2005). Nutritional facts concerning goat milk (*Capra hircus*) and its variations during the agroindustrial process. *Agronomía Mesoamericana*, 16(2), 239–252. <https://doi.org/10.15517/am.v16i2.11878>
- Geldsetzer-Mendoza, C., & Riveros, J. L. (2023). Morphophysiological responses of the goat mammary gland to water scarcity in arid and semi-arid environments: are they enough to generate adaptation to new climatic challenges? *Animals*, 13(24), 3825. <https://doi.org/10.3390/ani13243825>
- Organización Panamericana de la Salud (2023). Informe ONU: 131 millones de personas en América Latina y el Caribe no pueden acceder a una dieta saludable. <https://www.paho.org/es/noticias/19-1-2023-informe-onu-131-millones-personas-america-latina-caribe-no-pueden-acceder-dieta>
- Uscanga-Domínguez, L. F., Orozco-García, I. J., Vázquez-Frias, R., Aceves-Tavares, G. R., Albrecht-Junngghans, R. E., Amieva-Balmori, M., Bazaldua-Merino, L. A., Bernal-Reyes, R., Camacho-de León, M. E., Campos-Gutiérrez, J. A., Carmona-Sánchez, R. I., Castro-Marín, L. V., Coss-Adame, E., Cuevas-Estrada, A. J., Escobedo-Martínez, J. A., González-Franco, L. R., Huerta-Iga, F. M., Lozano-Lozano, R., Martínez-Vázquez, S. E., Milke García, M.P., Nogueira-de Rojas, J.R., Padilla-González, M., Pérez y López, N., Silva-Campechano, F., Treviño-Mejía, M.C., Velázquez-Alva, M. C. (2019). Technical position on milk and its derivatives in adult health and disease from the Asociación Mexicana de Gastroenterología and the Asociación Mexicana de Gerontología y Geriátría. *Revista de Gastroenterología de México*, 84(3), 357–371. <https://doi.org/10.1016/j.rgmx.2019.03.002>
- Zeña-Chiara, E. N., Huamanchay-Meza, A. V., Balladares-Quintana, A. D., Guadalupe-Sifuentes de Posadas, L. F., & Arias-Arroyo, G. C. (2023). Leche de cabra (*Capra aegagrus hircus*): una revisión de su valor nutricional, actividades biológicas, tratamiento térmico y productos alimenticios derivados. *Perspectivas en Nutrición Humana*, 25(2), 177-192. <https://doi.org/10.17533/udea.penh.v25n2a06>

Artículo Original

Dinámica de productos ecológicos frescos y su aporte a la seguridad alimentaria en Sucre

The dynamics of fresh ecological products and their contribution to food security in Sucre

Shamir Abujder^{1*} 

*Autor de Correspondencia: abujder7@hotmail.com

¹ Universidad Andina Simón Bolívar (UASB), Sucre, Bolivia.

Recibido: 15/10/2025 Aceptado para publicación: 02/12/2025 Publicado: 30/12/2025

Resumen

El presente artículo resume la importancia que tienen los productos ecológicos en los distritos urbanos del municipio de Sucre, Chuquisaca, y se centró en el análisis de la dinámica del mercado de productos ecológicos frescos, con énfasis en aquellos producidos bajo enfoques ecológicos, orgánico; para lo cual toma en cuenta a dos grupos: consumidores y productores/comercializadores, en el contexto de una agricultura urbana y periurbana. El objetivo principal del artículo es brindar conocimiento sobre la viabilidad económica de la comercialización de productos ecológicos frescos, considerando su potencial para fortalecer la seguridad alimentaria y fomentar emprendimientos sostenibles basados en alimentos sanos y limpios. Asimismo, busca contribuir al conocimiento ciudadano sobre el consumo responsable y saludable, alineado con las dimensiones de la agroecología. La metodología adoptó un enfoque cualitativo descriptivo que permite captar las percepciones reales de los actores involucrados en el mercado. Además, el artículo aporta evidencia empírica sobre las condiciones del mercado local de productos ecológicos frescos.

Palabras clave: Agroecología, canasta familiar, productos ecológicos, sostenibilidad.

Abstract

This article summarizes the importance of organic products in the urban districts of the municipality of Sucre, Chuquisaca, and focuses on the dynamics of the fresh organic produce market, with an emphasis on those produced using ecological and organic approaches. It considers two groups: consumers and producers/marketers, in the context of urban and peri-urban agriculture. The main objective of this article is to provide knowledge about the economic viability of marketing fresh organic products, considering their potential to strengthen food security and foster sustainable ventures based on healthy and clean foods. It also seeks to contribute to public knowledge about responsible and healthy consumption, aligned with the dimensions of agroecology. The methodology adopted a descriptive qualitative approach that captures the real perceptions of market stakeholders. Furthermore, the article provides empirical evidence on the conditions of the local fresh organic produce market.

Keywords: Agroecology, family basket, organic products, sustainability.

Introducción

En los últimos años el consumo de productos ecológicos ha tenido una tendencia creciente, esto debido a que algunas personas comprenden que los beneficios para su salud son valorables. La agricultura ecológica, con su base en principios agrícolas ecológicamente equilibrados, presenta una miríada de beneficios medioambientales, al evitar el uso de fertilizantes sintéticos y pesticidas, este tipo de agricultura no sólo aumenta la fertilidad del suelo, sino que también mejora la biodiversidad (Panday et al., 2022; Leifert, 2022). La mayoría de los países del mundo aplican leyes para proteger el medio ambiente (Tran, 2023); es de suma importancia el conocimiento de la población en el contexto local y nacional sobre el movimiento socio económico que generan los productos ecológicos frescos.

Por otro lado, los consumidores de productos ecológicos frescos actualmente van en crecimiento; además, apoyan a las empresas que observan principios ecológicos donde las operaciones de fabricación implican técnicas de producción respetuosas con el medio ambiente (Cruz, 2024); los consumidores también exigen calidad y seguridad de los productos ecológicos frescos, la calidad de los productos frescos se refleja en el sabor, el color, el valor nutricional y la seguridad microbiana (Rahman et al., 2021). El término productos ecológicos frescos incluye frutas y hortalizas frescas (*no sometidas a tratamiento térmico*) sin procesar y transformarse mínimamente (López et al., 2021); al ser fresco y mínimamente procesado y consumido crudo, el aporte nutricional es mayor, la seguridad alimentaria en los productos menos procesados se ha convertido en una prioridad tanto para los sectores público como para el sector privado (Santos et al., 2023).

La sostenibilidad de los alimentos sólo es alcanzable si también se logra la seguridad alimentaria, que es esencial para la agricultura alimentaria local, especialmente para la producción de alimentos frescos, como las verduras y las frutas. El análisis del efecto de la seguridad alimentaria en las nuevas metodologías sostenibles es esencial para garantizar que los sistemas alimentarios promuevan un consumo de alimentos seguro y sostenible (Macieira et al., 2021); Según estimaciones de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), alrededor de 828 millones de personas sufren inseguridad alimentaria, mientras que 1.300 millones de toneladas de alimentos, aproximadamente un tercio de todos los alimentos producidos en todo el mundo, se desperdician cada año (Sarangi et al., 2024); la inseguridad alimentaria es un tema que afecta a millones de personas a nivel mundial, particularmente a aquellos que presentan bajos ingresos, sin hogar o viven en desiertos de alimentos; la inseguridad alimentaria afecta negativamente el bienestar de las personas, aumentando el riesgo de una serie de enfermedades crónicas (Papargyropoulou et al., 2024; Shariatmadary et al., 2023). A este respecto, la agricultura ecológica está recibiendo una mayor atención por parte de los

consumidores y un mayor apoyo político por parte del gobierno central de cada país (Borghino et al., 2024).

En Bolivia se cuenta con varias normativas sobre la producción ecológica como, por ejemplo; la Ley 3525 de “regulación y promoción de la producción agropecuaria y forestal no maderable ecológica”. Dicha Ley 3525 tiene el objeto de: Regular, promover y fortalecer sosteniblemente el desarrollo de la Producción Agropecuaria y Forestal no Maderable Ecológica en Bolivia, la misma se basa en el principio que para la lucha contra el hambre en el mundo no solo basta producir más alimentos sino que estos sean de calidad, inocuos para la salud humana y biodiversidad, asimismo sean accesibles y estén al alcance de todos los seres humanos; y los procesos de producción, transformación, industrialización y comercialización no deberán causar impacto negativo o dañar el medio ambiente.

Por otra parte, la Norma Técnica Nacional de los Sistemas Participativos de Garantía (SPG), la cual es el instrumento legal que determina la forma de organización, estructura y funcionamiento de los SPG's; los cuales garantizan que los productos son ecológicos como también señalan los roles y funciones de los actores que participan y que son responsables de implementar el SPG, que garantiza la producción ecológica como una forma de certificación donde participan agricultores, consumidores, autoridades, instituciones y otros que se identifican con la producción ecológica, a estas personas se las denomina actores del SPG; por lo tanto, garantiza la calidad ecológica de los productos y genera confianza en los consumidores mediante un compromiso de control y garantía social, como también es función del SPG solicitar el uso de sello nacional para etiquetar los productos ecológicos. Los Sistemas de Garantía Participativa (PGS) son mecanismos de certificación de productos ecológicos y que se encuentran organizados por la comunidad. Los PGS se organizan localmente, por ejemplo, por organizaciones de productores o por redes de consumidores productores; los PGS se han ido expandiendo considerablemente a nivel mundial (Jacobi et al., 2023; Kaufmann et al., 2023).

Autores como, (Moura et al., 2024); indican que las nuevas investigaciones deberían examinar las configuraciones de sistemas de producción más viables desde el punto de vista económico, social y ambiental. Conocer el movimiento económico que generan los productos ecológicos frescos es esencial sobre todo si los costos de producción no son elevados; (Feledyn-Szewczyk & Kopinski, 2024); señala que el principal factor que determina la alta eficiencia económica de las explotaciones en la producción ecológica es la utilización de un menor nivel de insumos.

Sin embargo, la producción ecológica también contribuye como una práctica empresarial por excelencia debido a que satisface las demandas de eficiencia de uso de los recursos y reducción del impacto ambiental; para comprender mejor es esencial evaluar la competitividad económica que existe de la agricultura ecológica en comparación con los métodos convencionales a nivel de

sistemas agrícolas (Souza et al., 2024; Riar, 2024).

En este contexto el artículo tiene el objetivo principal de describir el comportamiento en la dinámica que existe entre los clientes, productores y comercializadores de productos ecológicos frescos en el municipio de Sucre; con el fin de contribuir al conocimiento de las personas y la comunidad científica; además, describe la alternativa para la sustentabilidad socio económica a partir de los resultados de una investigación realizada. La gestión del conocimiento es un método de gestión, con el propósito de emplear el conocimiento generado de manera estructurada y sistemática hacia la población en general (Cruz, 2024). Por otro lado, para algunos autores como (Bas et al., 2024); el nivel de conocimiento, el miedo a la pérdida de la salud y la accesibilidad a los alimentos ecológicos u orgánicos son los factores fundamentales que afectan al consumo de productos ecológicos en general. A medida que los consumidores se vuelven más conscientes de sus opciones dietéticas, están dispuestos a pagar un costo extra por la adquisición de alimentos ecológicos (Shenoy et al., 2024).

Materiales y Métodos

Existen diferentes tipos de investigación científica, sin embargo para autores como; (Hernández et al., 2014), la investigación mixta, es un paradigma en la investigación relativamente reciente en las últimas dos décadas e implica combinar los enfoques cuantitativo y cualitativo en un mismo estudio: La investigación tiene un enfoque de tipo mixta. La descripción cualitativa emerge como un método introductorio fundamental en la investigación para estudiantes de maestría y aprendices de investigación, su principal fortaleza radica en el enfoque directo y adaptable que enfatiza las descripciones directas de experiencias y eventos, tiene como objetivo responder a las preguntas de quién, "qué", cuando, en dónde, y "cómo" (Hall & Liebenberg, 2024; Holmes et al., 2023).

La investigación cualitativa descriptiva, con énfasis en el contexto, la existencia, la experiencia, la perspectiva, el significado y la subjetividad, ofrece una lente única a través de la cual explorar e interpretar las complejidades de los fenómenos sociales (Lim, 2025); una descripción coherente y temático que permite a los investigadores captar la complejidad y diversidad de los datos y generar ideas que pueden informar la política (Rana et al., 2023).

El método descriptivo se utilizó para realizar un análisis respecto al objetivo de brindar conocimiento con el máximo rigor o exactitud posible, la información sobre una realidad; con el fin de exponer y describir directamente los diferentes resultados de acuerdo al enfoque temático de los productos ecológicos frescos en el municipio de Sucre.

El método analítico permite la comparación, permitiendo establecer relaciones de causalidad, es un método fundamental para toda investigación científica o

académica y es necesario para realizar operaciones teóricas como son la conceptualización y la clasificación (Doltade & Saudagar, 2023) el análisis consiste en descomponer un fenómeno en sus partes y relaciones para estudiar su comportamiento, mientras que la síntesis integra dichos elementos para identificar relaciones y características generales de la realidad.

El estudio se caracteriza por la recopilación y análisis de información contenida en, artículos científicos, tesis y otros documentos académicos. En esta línea, se realizó el análisis correspondiente en base a todos los resultados descritos por lo que el método analítico fue utilizado en este artículo directamente; además, de relacionar algunas variables entre los actores de estudio involucrados con los productos ecológicos frescos, y así obtener un mejor grado de síntesis en la descripción de los resultados de acuerdo con la información recopilada (Sánchez et al., 2023).

La técnica utilizada fue la encuesta, para la recopilación de información respecto a analizar la dinámica de mercado que existe en el municipio de Sucre; por lo que, fue direccionada en dos grupos de la población por una parte a clientes y/o consumidores, y por otra parte a los productores/comercializadores. La técnica ofrece varias ventajas a la hora de evaluar los objetivos de un estudio, una encuesta facilita la recopilación directa de datos de los actores de investigación, proporcionando una visión más profunda de sus percepciones y prioridades (Shariatmadary et al., 2023).

Respecto a la descripción de la población se realizó en el municipio de Sucre (Figura 1, Figura 2), el cual presenta un área urbana de 237.480 personas; y se encuentra situado a una altura aproximada de 2750 msnm., la ciudad de Sucre se encuentra situada entre los 19°3'2" de Latitud Sur y los 65°47'25" de Longitud Oeste del meridiano de Greenwich, conformando parte de la unidad geomorfológica denominada "Cordillera Andina Oriental" (PTDI, 2020). Según Instituto Nacional de Estadística, (INE, 2025); en los distritos 1 al 5 del municipio de Sucre, se tiene una población de 117.833 habitantes dentro del grupo etario de 20 a 60 años con una proyección de crecimiento en la población del 11% entre el año 2012 y 2020 con una cifra de 130.477 habitantes.

Con relación a la proyección de migración que se presenta en el municipio de Sucre en el año 2012, se tiene una tasa de migración del -9,5% respecto a una población de 596.470 personas, y para el año 2020 se tiene una tasa de migración de aproximadamente el -7,3% respecto a una población de 637.013 personas. El factor económico del hogar constituye un determinante clave en la adquisición de productos de la canasta familiar, particularmente de los productos ecológicos frescos, comercializados en mercados, tiendas y ferias agro-productivas, suelen presentar precios superiores. En consecuencia, el elevado costo limita su acceso y consumo, dependiendo de la capacidad económica de cada familia.

Tamaño de la muestra

Para conocer cómo se tomó el tamaño de la muestra es necesario indicar que según (Paz et al., 2017); existen dos fórmulas para hallar el tamaño de muestra estas son; la finita e infinita; para el cálculo del tamaño de la muestra teniendo conocimiento del tamaño de la población se utiliza la finita, en tanto si no se conociera la población

se utiliza la fórmula infinita. La fórmula utilizada para obtener el tamaño de la muestra:

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

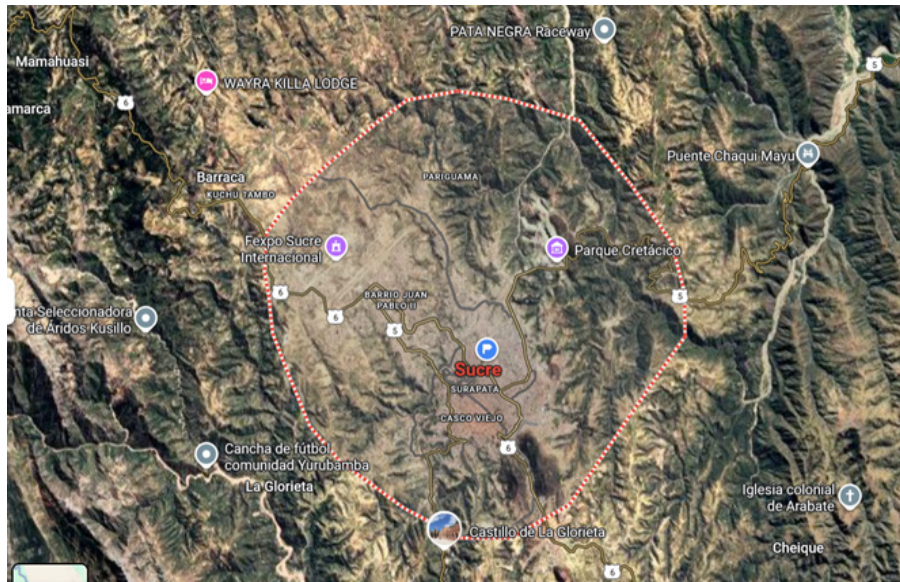


Figura 1. Ubicación satelital del municipio de Sucre. Fuente: Google Maps, disponible en: (<https://maps.app.goo.gl/xqgdQbXcQSiZsw1D9>).

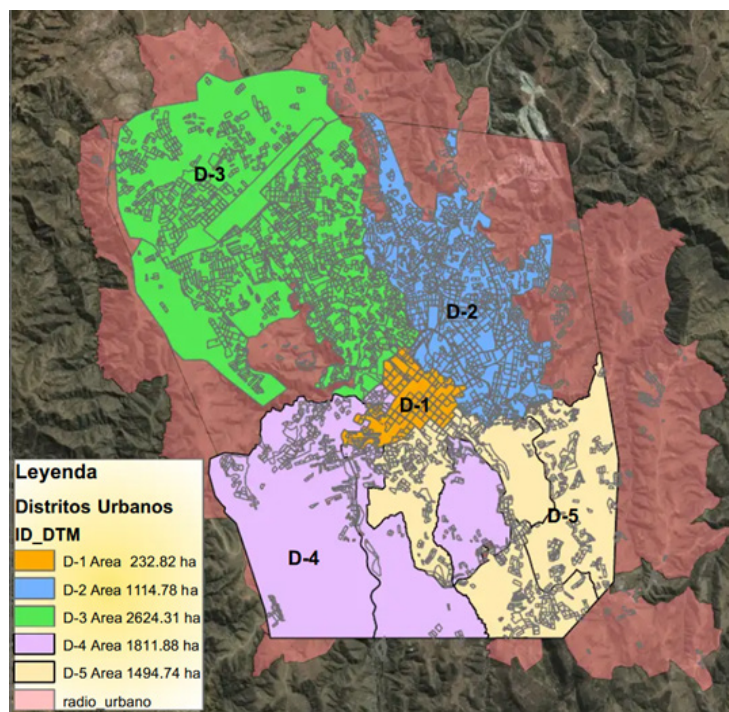


Figura 2. Plano urbano del municipio de Sucre. Fuente: Google Maps, disponible en: (<https://es.scribd.com/document/537434925/Plano-Municipal-de-Sucre>)

Donde:

n = tamaño de la muestra.
N = tamaño de población.
Z = nivel de confianza.
P = Probabilidad de éxito o proporción esperada.
Q = probabilidad de fracaso (p - 1).
D = Precisión (Error máximo admisible en términos de proporción).

Partiendo de los datos según el (INE, 2025), y el censo poblacional del año 2012 la población en un rango de edad entre 20 a 60 años es de 117.833 personas (Tabla 1); por lo que, para esta investigación este dato será tomado en cuenta y de esta manera definir el tamaño de la muestra respecto a los clientes.

Tabla 1. Población de los 5 distritos que abarca la ciudad de Sucre. Fuente. Instituto nacional de estadística (INE, 2012).

Edad	Distrito 1	Distrito 2	Distrito 3	Distrito 4	Distrito 5	TOTAL
20 a 39	7480	38052	17628	9403	10235	82798
40 a 60	3694	16014	7327	3789	4211	35035
TOTAL	11174	54066	24955	13192	14446	117833

Según (Salazar, 2010); indica que el 13% de la población del municipio de Sucre en el departamento de Chuquisaca, si consumen productos ecológicos, mientras que el 87% de la población no consumen productos ecológicos.

Entonces: N = 117833; Z = 1.96; P = 0.13; Q = 0.87; D = 0.05

Reemplazando en la fórmula:

$$n = \frac{117833 * 1.96^2 * 0.13 * 0.87}{0.05^2 * (117833 - 1) + 1.96^2 * 0.13 * 0.87}$$

n = 174 encuestas.

Por lo tanto, para definir el tamaño de la muestra en esta investigación respecto a los comercializadores de productos ecológicos frescos en el municipio de Sucre, se toma como base el dato, según la Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación FAO, respecto al proyecto de agricultura urbana y periurbana AUP, en el municipio de Sucre, se tiene una población de 628 unidades productivas urbanas y periurbanas de las cuales solo una cifra de 380 productores y comercializadores, tendrían una certificación bajo producción ecológica donde 326 cuentan con el sello ecológico del SPG; 52 en (transición 2) y tan solo 2 se encuentran en (transición 1).

Entonces: N = 380; Z = 1.96; P = 0.97; Q = 0.03; D = 0.05

Reemplazando en la fórmula:

$$n = \frac{380 * 1.96^2 * 0.97 * 0.03}{0.05^2 * (380 - 1) + 1.96^2 * 0.97 * 0.03}$$

n = 41 encuestas.

En este estudio se analizó diferentes resultados respecto a la dinámica de los productos ecológicos frescos y cuál es su contribución hacia miras de lograr una seguridad alimentaria en el municipio de Sucre, tomando en cuenta a los consumidores y/o clientes como por otro lado a los comercializadores/productores de productos ecológicos frescos. Posteriormente se analiza los resultados obtenidos a partir de bibliografía consultada y de esta manera se logre sistematizar toda la información describiendo así los hallazgos más relevantes para la temática de estudio.

Primeramente, señalar que para la obtención de los resultados en relación a la dinámica de los productos ecológicos frescos que se presenta en el municipio de Sucre, se observó que se establecieron diferentes herramientas utilizadas como son; las guías para la entrevista y el cuestionario, y de esta manera se formularon preguntas pertinentes a la temática de esta investigación; posteriormente crearon diferentes encuestas a realizar, mismas que fueron dirigidas tanto a clientes y/o consumidores, como también a los comercializadores de los productos ecológicos frescos en el distrito urbano del municipio de Sucre. Donde luego procedieron a la recolección de datos en el área de estudio; para obtener la información necesaria se contó con ayuda de diferentes encuestas realizadas a los sujetos de observación, como por una parte son los clientes y/o consumidores, y por otra parte los comercializadores de productos ecológicos frescos, donde los puntos de muestreo fueron ferias ecológicas y comercios de producción limpia.

Una vez recopilada toda la información de datos necesarios para demostrar hallazgos sobre la dinámica de los productos ecológicos frescos, se procedió a la sistematización estadística utilizando un software de análisis de los resultados. Con esto se obtuvo los resultados estadísticos en base a las respuestas de las encuestas donde previamente se seleccionó los datos del cliente por un lado y finalmente los datos del productor/comercializador por otro; para así de esta forma lograr un mejor orden a la hora de introducir los datos en el sistema. Además, hay que indicar que para dicha sistematización respecto a la introducción de datos al software de análisis estadístico; esta fue minuciosa para así evitar errores con los resultados y su posterior interpretación.

Resultados

Género de los encuestados

Tener conocimiento sobre el género de los que participaron como objeto de estudio dentro de una investigación es de suma importancia, el género de los clientes fue un total de 174 clientes encuestados, de los cuales el 60.3% corresponde al género femenino con alrededor de 105 mu-

jeros; mientras que el 39.7% presenta una cantidad de 69 hombres. Por otra parte, para los productores/comercializadores de productos ecológicos frescos, el 61% de los productores/comercializadores corresponden al género femenino con 25 mujeres; mientras que el 39% al género masculino con 16 hombres. Esto deja en claro que la mayoría que comercializan los diferentes productos ecológicos frescos son mujeres.

Conocimiento de productos ecológicos

Los clientes conocen los diferentes tipos de productos ecológicos frescos, entre hortalizas, frutas, tubérculos; un 100% de los clientes señaló que conocen todos los productos anteriormente citados. El 66.1% si conoce sobre los productos ecológicos frescos, mismo que corresponde a 115 personas; y el 32.8% tienen un conocimiento medio, con una cifra de 57 personas; mientras que 2 personas que corresponden al 1.1% no tienen conocimiento.

Por otro lado, el 100% de los productores/comercializadores de productos ecológicos frescos tienen conocimiento de lo que significa el concepto de sistema de producción ecológica, esto con el fin de ofertar adecuadamente sus productos con mayor facilidad, porque al existir una competencia en la oferta desde una perspectiva de marketing en negocios. Además, ellos señalan que deben tener un amplio conocimiento sobre los productos que comercializan.

Adquisición de productos ecológicos frescos

En cuanto a la adquisición productos ecológicos frescos, el índice de clientes y/o consumidores que ha comprado y alguna vez productos ecológicos frescos tiene una cifra de 64.9%, correspondiente a una cantidad de 113 personas, mientras que el 34.5% si realiza compras de productos ecológicos frescos los cuales corresponden a 60 personas.

Lugar de adquisición de productos ecológicos frescos

Sobre la preferencia del cliente donde realizan la adquisición de los diferentes productos ecológicos frescos, como se puede observar en la [Figura 3](#), la cantidad mayor de clientes corresponde a una cifra del 71.3% los cuales realizan sus compras en ferias especializadas en la comercialización de productos obtenidos mediante un sistema de producción ecológica. Mientras que el 16.7% de los clientes realizan sus compras en el mercado.

Percepción sobre el consumo de productos ecológicos frescos

Los clientes consideran importante consumir productos ecológicos frescos porque son inocuos para su salud y el Medio Ambiente, el 77.6% de clientes realmente si consideran este aspecto de suma importancia. Mientras que el 21.8% de clientes considera que los productos son de buena calidad.

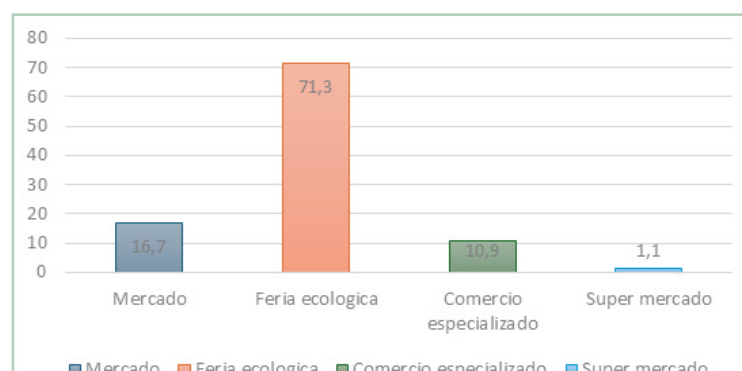


Figura 3. Porcentaje de clientes según lugar de adquisición.



Figura 4. Feria ecológica en el parque multipropósito de Sucre. Fotografía propia, lugar parque multipropósito del municipio de Sucre (2022).

Otro aspecto es la disponibilidad del cliente para comprar productos ecológicos frescos; conocer la necesidad de por qué los clientes adquieren productos ecológicos, contribuye al comercializador para tomar en cuenta una estrategia de mercado respecto a la oferta y demanda. El 0.6% de clientes están dispuestos a comprar productos ecológicos frescos debido a que su precio es adecuado a la calidad del producto; el 21.3% de los clientes realizan la compra de dichos productos por beneficio a su salud; el 34.5% de los clientes tienen la disposición de adquirir porque viene de una producción libre de agentes tóxicos; sin embargo, el 43.7% de los clientes señalan que todas estas opciones anteriormente mencionadas son válidas a la hora de hacer la adquisición de productos ecológicos frescos.

La relación sobre las variables de conocimiento de los productos ecológicos frescos y la razón por la cual estarían dispuestos a adquirir este tipo de productos, para el análisis de relación sobre los clientes como se observa en la Tabla 2, la cual demuestra que existe una asociación entre estas dos variables mencionadas; debido a que el grado de significancia es menor al 0.05; estas dos variables de conocimiento y disposición de compra no solo tienen una gran relación si no que, también demuestran que la población en el municipio de Sucre, presenta un gran interés en el cambio de hábitos en su alimentación como en el respeto al medio ambiente.

Tabla 2. Relación del conocimiento de productos ecológicos y su disposición de compra.

Descripción	Valor	gl	Significación asintótica (bilateral)
Chi-cuadrado de Pearson	40,579a	6	0,000
Razón de verosimilitud	40,282	6	0,000
Asociación lineal por lineal	21,810	1	0,000
N de casos válidos	174		

Oferta de los productos ecológicos frescos

Las consideraciones sobre la cantidad ofertada por los diferentes productores y comercializadores en el municipio de Sucre, dejó un 55.2% de clientes que consideran a la oferta de productos ecológicos frescos poco suficiente. Sin embargo, el 36.8% de clientes consideran que es insuficiente, y tan solo el 8% indica que el producto ofertado es suficiente. Respecto a la disposición monetaria con la que cuentan los clientes, para la adquisición de productos ecológicos frescos, el 62.6% de clientes tienen disposición máxima de 600 Bs. mensuales destinados a la adquisición de productos; por otra parte, el 23% de clientes disponen 800 Bs, mientras que el 13.2% disponen un máximo de 400 Bs; para la adquisición. Conocer esta cifra es muy importante para ampliar la oferta de mercado, es necesario que el productor y comercializador cuenten con el conocimiento de estos datos para analizar si existe la disposición por parte del cliente.

Finalidad de la comercialización de productos ecológicos frescos

El comercializador de productos ecológicos frescos, tiene una finalidad para comercializar sus diferentes productos; cabe destacar que el 39% de comercializadores tienen la finalidad de contribuir a la salud de la población, el 29.3% solo quieren satisfacer la demanda existente; y el 31.7% para contribuir a la seguridad alimentaria.

Garantía del producto ecológico

Conocer la relación que presentan las variables como ser la garantía que presenta un producto ecológico fresco y la finalidad de venta que considera el comercializador/productor es esencial, en este sentido; la Tabla 3 demuestra que las dos variables analizadas presentan una gran relación debido a que según los resultados el grado de significancia es de 0.019; siendo este menor al 0.05, conocer que los comercializadores presentan un sello ecológico certificado para la venta de sus productos contribuye a la confianza del cliente; también la finalidad de venta que es contribuir a la salud del consumidor, brindando así seguridad alimentaria en el municipio.

Tabla 3.E Relación de la garantía del producto ecológico y su finalidad de venta.

Descripción	Valor	gl	Significación asintótica (bilateral)
Chi-cuadrado de Pearson	7,912a	2	0,019
Razón de verosimilitud	8,110	2	0,017
Asociación lineal por lineal	3,809	1	0,051
N de casos válidos	41		

Identificación del producto ecológico

Es esencial que los clientes que adquieren y consumen los productos ecológicos frescos puedan identificar de alguna manera si un producto es ecológico o no, el 65.5% de los clientes están conformes si el producto ecológico tuviera un sello ecológico, que distinga el producto ecológico entre los demás que no lo son. Mientras que el 33.9% de clientes señalan que se debería tener un etiquetado. Sin embargo, para un productor o comercializador es de suma importancia que su producto cuente con alguna garantía, porque solo así podrán llegar a más clientes, todo esto debido a la confianza que genera el contar con algún tipo de garantía en que sus productos cumplen las normas de calidad; por lo que, el 61% no cuentan con ningún tipo de sello o distinción de que su producto es netamente ecológico; y el 39% demuestra que existen productores o comercializadores que si cuentan con un sello (SPG).

En cuanto a los costos de producción se refiere por parte de los productores/comercializadores los cuales definen diferentes precios de sus productos ecológicos

frescos; el 75.6% de los productores/comercializadores asciende a un costo anual de 5.000 Bs. Señalan que esto es debido a que la producción ecológica todavía la realizan pequeños productores; sin embargo, el 19.5% se encontrarían en medianos productores y el 4.9% serán grandes y medianos productores.

El conocimiento de la utilidad de un negocio es fundamental, porque así una persona puede tener idea si un negocio es rentable o no; es decir que al notar si un determinado negocio genera recursos económicos, el comerciante dedicara parte de su tiempo al mismo y así emprender en su propio negocio. El 48.8% de comercializadores aseguran tener una utilidad de un 20% anual; mientras que el 34.1% aseguran tener una utilidad del 30% anual; sin embargo, el 14.6% aseguran tener un 40% de utilidad anual; y tan solo el 2.4% de comercializadores aseguran tener el 50% de utilidad anual.

La distribución es el instrumento del marketing que relaciona la producción con el consumo, y tiene por objeto transportar los productos desde el productor al consumidor en el tiempo, lugar y cantidad adecuados. El marketing aquí tiene la tarea de información, promoción y presentación del producto en el punto de venta.

Los diferentes canales de distribución de productos ecológicos por parte de los productores/comercializadores, es fundamental a la hora de pensar en crecer como comercializador en el negocio, debido que al tener una idea de cuál es el canal de distribución por el que se realizan mayores ventas; así pueden realizar específicas estrategias de marketing en los diferentes canales de distribución de productos ecológicos frescos, en su mayoría los productores/comercializadores se encuentran en una feria de productos ecológicos, con una cifra del 53.7%. Sin embargo, un porcentaje considerable correspondiente al 31.7% realizan la distribución de sus productos en los principales mercados de la ciudad de Sucre; y solo el 14.6% realizan la distribución de sus productos en comercios especializados en producción ecológica.

Análisis de la oferta y demanda

Este análisis brinda conocimiento de cómo se encuentran por una parte los clientes y por otra los productores/comercializadores. Lo cual es fundamental para los comercializadores desde su perspectiva económica que genera la demanda de productos ecológicos frescos como ser hortalizas; por otro lado, los clientes pueden generar una satisfacción o no respecto a la oferta de los diferentes productos ecológicos frescos.

Como se observa en la [Figura 5](#), de oferta y demanda respecto a las hortalizas para las temporadas de primavera y verano donde la demanda primavera DP, oferta OP, correspondiente a la primavera; y demanda DV, oferta OV, correspondiente al verano. Se aprecia que en el mercado existe un aumento proporcional en la oferta y demanda, por lo que el precio de equilibrio se mantiene,

sin embargo, la cantidad aumenta.

Debido a esto existe una satisfacción en los clientes respecto al precio de compra; por otra parte, los productores/comercializadores también se encuentran satisfechos ya que como se vio anteriormente una cifra del 53.7% de los productores/comercializadores afirman que incrementan sus ventas en la temporada de verano.

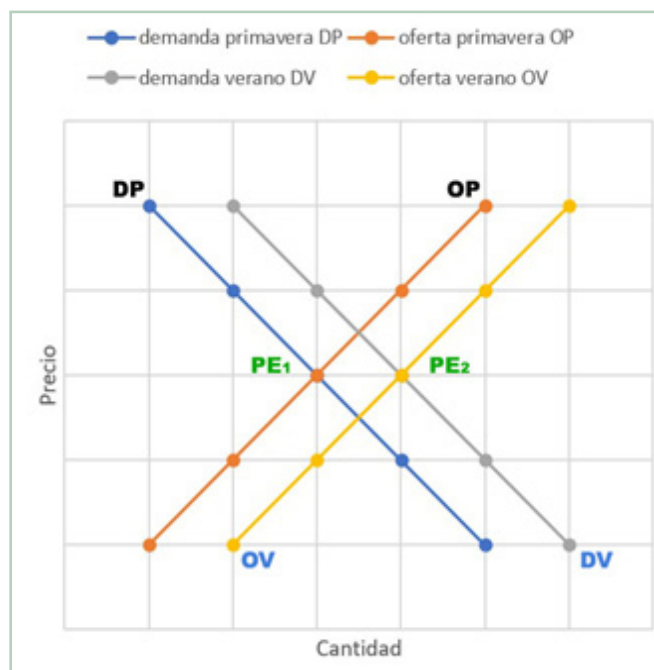


Figura 5. Relación de la oferta y demanda de hortalizas.

Tomando como base los resultados obtenidos en las encuestas, el costo anual de producción según productores/comercializadores es de 5.000 Bs./año, para la producción de hortalizas respecto a productos ecológicos frescos; ellos solo consideran costos de agua, herramientas de cultivo, y semillas; Sin embargo, se debe considerar los gastos en la comercialización como ser transporte, alimentación, bolsas, mano de obra, entre otras, para lo que se estima una cifra global de 8.280 Bs./año. Por otra parte, según datos de las encuestas realizadas ellos cuentan con un ingreso mínimo de 50 Bs./día por la venta de sus hortalizas frescas teniendo así un beneficio anual de 18.000 Bs. Por lo que se estima una utilidad anual de 4.720 Bs. En este sentido, se determina que existe viabilidad económica en la comercialización de productos ecológicos frescos. Además, en lo que refiere a la parte social los productores y comercializadores inciden en satisfacer la demanda, contribuir a la salud y seguridad alimentaria en el municipio de Sucre.

Relación de los resultados entre cliente y productor/comercializador

En la [Figura 6](#), se observa detalladamente que respecto al conocimiento de productos ecológicos el 100% de los productores/comercializadores si tienen conocimiento; en tanto los clientes solo presentan conocimiento con una cifra de 66.1%. Con relación a la adquisición por parte

de los clientes el 71.3% realizan sus compras en ferias ecológicas, con lo cual los productores/comercializadores también estarían de acuerdo porque el 53.7% de los mismos realizan sus mayores ventas en ferias ecológicas. Otra relación es el tema de salud porque el 77.6% de los clientes adquieren estos productos por su salud, mientras que el

39% de los productores/comercializadores se dedican a la distribución de productos ecológicos para contribuir a la salud de los clientes; por otra parte, el 65.5% de clientes identificarían el producto mediante un sello ecológico, y tan solo el 39% de los productores/comercializadores cuentan con sello (SPG) en sus diferentes productos.

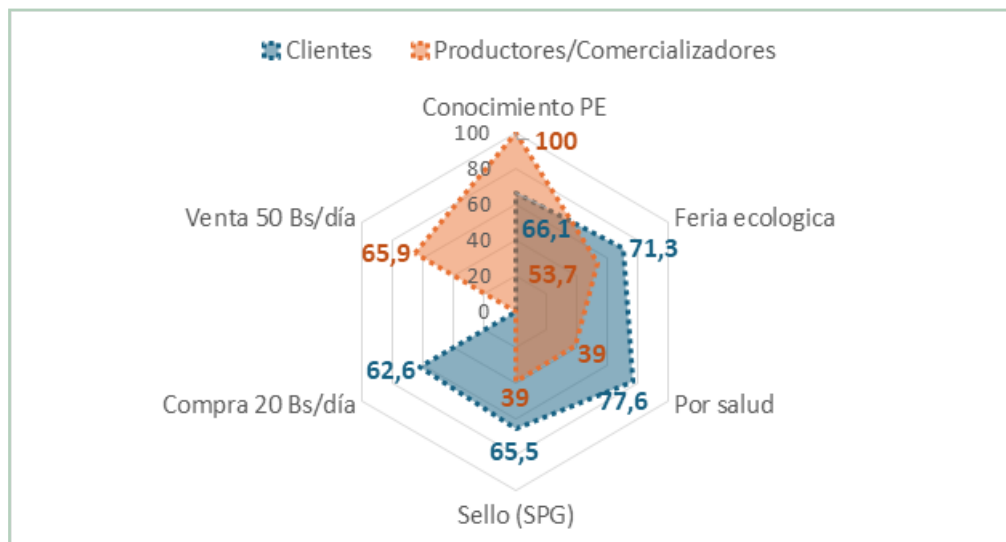


Figura 6. Relación clientes productor/comercializadores.

En cuanto al gasto que implica a las compras diarias que realizan los clientes, el 62.6% de clientes gastan 20 Bs/día, en la adquisición de productos ecológicos; mientras que el 65.9% de los productores/comercializadores perciben un ingreso de 50 Bs/día, por la venta de sus productos.

Discusión

Según (Salazar, 2010); en un trabajo intitulado, La inversión pública agroecológica en Chuquisaca y la incidencia de los riesgos medio ambientales; “El 13% de las personas consumen productos ecológicos alguna vez; y las que no consumen productos ecológicos son el 87% del municipio de Sucre”. El presente artículo expone que en el municipio de Sucre; con una cifra del 34.5% realizan compras y consumen productos ecológicos frescos, mientras que el 64.9% han realizado la adquisición alguna vez, y tan solo el 0.6% no adquieren productos ecológicos.

Según (Cerrada, 2015); en un trabajo intitulado, Análisis de sistemas de producción agroecológica y sus implicaciones económicas en explotaciones campesinas de la Región Sierra de Ecuador; “Señala que el ingreso monetario anual correspondiente por la venta de hortalizas frescas es de 2,544.00 USD, bajo un sistema de producción agroecológica”. Cabe señalar que, en el municipio de Sucre; el ingreso monetario anual que percibe un comercializador de productos ecológicos frescos es de 18,000.00 Bs. respecto a la venta de hortalizas bajo un sistema de producción ecológica, con un costo de producción del 27.78% con relación al ingreso monetario anual percibido.

El artículo demuestra que el 77.6% de clientes adquieren productos frescos ecológicos porque son inocuos para su salud, mientras que el 39% de los productores/comercializadores se dedican a la distribución de productos ecológicos para contribuir a la salud de la población, este mismo porcentaje de productores/comercializadores cuenta con el sello (SPG) en sus diferentes productos; por otra parte, cabe mencionar que el 65.5% de clientes señalaron que identificarían el producto mediante un sello ecológico.

Esto lleva a que la promoción del consumo interno y las compras públicas en beneficio de los pequeños productores fortalecen a la seguridad alimentaria en el municipio de Sucre, debido al autoconsumo que existe en toda esta cadena la cual está formada por los productores, comercializadores y consumidores. Además, de la contribución hacia el Medio Ambiente bajo un sistema de producción ecológica misma que utiliza agroquímicos y un control biológico inocuos para el ser humano y nuestra Madre Tierra.

Conclusiones

El artículo ha permitido demostrar que el 34.5% de clientes consumen productos ecológicos frescos, mientras el 64.9% consume algunas veces, y solo el 0.6% no consume estos productos, debido principalmente a la deficiencia en la oferta de estos productos. Referente a la viabilidad económica, el 65.9% los productores/comercializadores indican que existe una variación respecto al negocio de

comercialización de productos ecológicos frescos; por lo que, es muy interesante por la relación con el impacto socio económico que esto significa. La certificación del Sello SPG (Sistema Participativo de Garantía) de producción ecológica y en transición, se convierte en una excelente norma al momento de comercializar este tipo de productos.

Se ha evidenciado que el productor y/o comercializador consume los alimentos que produce y diversifica su dieta, por lo que mejoran su nivel nutricional; por esta razón se aprovechan directamente los nutrientes presentes de estos alimentos, lo que contribuye a la seguridad alimentaria del municipio de Sucre. Referente a la demanda, los clientes buscan satisfacer sus necesidades relacionando la toma de decisiones como consumidores respecto al precio, salud, placer o comodidad para su adquisición en cuanto a los productos ecológicos frescos puede satisfacer sus demandas. La producción agroecológica en huertos urbanos y periurbanos se convierte en un gran aporte para disminuir los efectos negativos hacia el Medio Ambiente, ya que no utiliza agroquímicos sintéticos para su producción.

Referencias

- Bas, M., Kahriman, M., Cakir, N., & Seçkiner, S. (2024). Results from Türkiye: Which Factors Drive Consumers to Buy. *Foods*, 13, 2. <https://doi.org/10.3390/foods13020302>
- Borghino, N., Wissinger, L., Erb, K., Mouel, C., & Nesme, T. (2024). Organic farming expansion and food security: A review of foresight modeling studies. *Global Food Security*, 41. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2024.100765>
- Cerrada, P. (2015). Análisis de sistemas de producción agroecológica y sus implicaciones económicas en explotaciones campesinas de la Región Sierra de Ecuador. Universidad politécnica de Valencia, Departamento de economía y ciencias sociales, Valencia – España. <https://riunet.upv.es/entities/publication/01525c97-6823-4534-834a-bb085d1f7f16>
- Cruz, M. (2024). Gestión Del Conocimiento Basado En El Consumo De Productos Verdes. *Revista Vértice Universitario*, 1. <https://doi.org/10.36792/rvu.v26i95.109>
- Doltade, M., & Saudagar, R. (2023). The Analytical Method Development and Validation: A Review. *Journal of Drug Delivery and Therapeutics*, 9, 2-4. <https://doi.org/10.22270/jddt.v9i3.2774>
- Feledyn-Szewczyk, B., & Kopinski, J. (2024). Productive, Environmental and Economic Effects of Organic and Conventional Farms — Case Study from Poland. *Agronomy*, 16. <https://doi.org/10.3390/agronomy14040793>
- Hall, S., & Liebenberg, L. (2024). Qualitative Description as an Introductory Method to Qualitative Research for Master's-Level Students and Research Trainees. *International Journal of Qualitative Methods*, 23, 4. <https://doi.org/10.1177/160940406924124226>
- Hernández, R., Fernandez, C., & Baptista, L. (2014). Metodología de la investigación. México. Best Seller.
- Holmes, C., Guliford, M., Mendoza-Davé, M., & Jurkovich, M. (2023). A Case for Description. Cambridge University Press on behalf of American, The Profession, 57, 2. <https://doi.org/10.1017/S1049096523000720>
- INE. (15 de septiembre de 2025). Instituto Nacional de Estadística de Bolivia. <https://www.ine.gob.bo/>
- Jacobi, J., Toledo, D., Solar, J., & Bürgi, E. (2023). "First we eat and then we sell": Participatory guarantee systems for alternative sustainability certification of Bolivian agri-food products. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 47, 2-4. <https://doi.org/10.1080/21683565.2022.2131692>
- Kaufmann, S., Hruschka, N., & Vogl, C. (2023). Participatory Guarantee Systems — a more inclusive organic certification alternative. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, 3. <https://doi.org/10.3338/fsufs.2023.1176057>
- Leifert, C. (2022). Organic Farming Provides a Blueprint to Improve Food Quality, Safety and Security. *Agronomy*, 2-3. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030631>
- Lim, M. (2025). What Is Qualitative Research? An Overview and Guidelines. *Foundational Approaches*, 1. <https://doi.org/10.1177/14413582241264619>
- López, F., Gómez, P., Artéz, F., Artéz-Hernandez, F., & Aguayo, E. (2021). Interactions between Microbial Food Safety and Environmental Sustainability in the Fresh Produce Supply Chain. *Foods*, 3. <https://doi.org/10.3390/foods10071655>
- Macieira, A., Barbosa, J., & Teixeira, P. (2021). Food Safety in Local Farming of Fruits and Vegetables. *Environmental Research and Public Health*, 10. <https://doi.org/10.3390/ijerph18189733>
- Moura, A., Picanco, V., & Mesagge, L. (2024). The sustainability challenges of fresh food supply chains: an integrative framework. *Environment Development and Sustainability*, 3. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-04850-9>
- Panday, D., Brusar, N., Das, S., & Ghalegholabebbahani, A. (2022). Rooted in Nature: The Rise, Challenges, and Potential of Organic Farming and Fertilizers in Agroecosystems. *Sustainability*, 4-5. <https://doi.org/10.3390/su16041530>
- Papargyropoulou, E., Bridge, G., Woodcock, S., Strachan, E., Rowlands, J., & Boniface, E. (2024). Impact of food hubs on food security and sustainability: Food hubs perspectives from Leeds, UK. *Food Policy*, 128, 2. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2024.102705>
- Paz, K., Salazar, F., & Torres, M. (2017). Tamaño de una muestra para investigación de mercado. Universidad Rafael Landívar, 11.
- PTDI. (2020). Plan Territorial de Desarrollo Integral. Gobierno Autonomo Municipal de Sucre, Sucre - Bolivia.
- Rahman, S., Mele, M., Lee, T., & Islam, M. (2021). Consumer Preference, Quality, and Safety of Organic and Conventional Fresh Fruits, Vegetables, and Cereals. *Foods*, 10, 1-2. <https://doi.org/10.3390/foods10010105>
- Rana, K., Poudel, P., & Chimoriya, R. (2023). Qualitative Methodology in Translational Health Research: Current Practices and Future Directions. *Healthcare*, 11(19), 2665. <https://doi.org/10.3390/healthcare11192665>
- Riar, A. (2024). Farm-gate profitability of organic and conventional farming systems in the tropics. *International Journal Of Agricultural Sustainability*, 22, 2-3. <https://doi.org/10.1080/14735903.2024.2318933>
- Salazar, J. (2010). La inversión pública agroecológica en Chuquisaca y la incidencia de los riesgos medio ambientales. . . Universidad Mayor Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, Sucre – Bolivia.
- Sánchez, D., de la Cruz, R., López, L., & Roman-Acosta, D. (2023). Fundamentals and applications of research methodology: Approaches, phases and scientific validity. *Seminars in Medical Writing and Education*, 3. <https://doi.org/10.56294/mw2023158>
- Santos, M., Grácio, M., Gamoosas, M., Pedroso, L., & Lima, A. (2023). One Health Perspectives on Food Safety in Minimally Processed Vegetables and Fruits: From Farm to Fork. *Microorganisms*, 1-2. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11122990>
- Sarangi, P., Pal, P., Singh, A., Sahoo, U., & Prus, P. (2024). Food Waste to Food Security: Transition from Bioresources to Sustainability. *Resources*, 2. <https://doi.org/10.3390/resources13120164>

Shariatmadary, H., O'Hara, S., Graham, R., & Stuiver, M. (2023). Are Food Hubs Sustainable? An Analysis of Social and Environmental Objectives of U.S. Food Hubs. *Sustainability*, 5. <https://doi.org/10.3390/su15032308>

Shariatmadary, H., O'Hara, S., Graham, R., & Stuiver, M. (2023). Assessing Sustainability Priorities of U.S. Food Hub Managers: Results from a National Survey. *Foods*, 2-3. <https://doi.org/10.3390/foods12132458>

Shenoy, R., Ranjith, V., Nayak, S., & Anirvinna, C. (2024). Conceptualizing organic food consumption: a consumer-centred scoping review. *Cogent Social Sciences*, 10, 2. <https://doi.org/10.1080/23311886.2024.2338864>

Souza, A., Kapp, C., Zarpellon, F., & Pereira da Veiga, C. (2024). Sustainable production and consumption: assessing the economic viability of traditional and organic yerba mate cultivation. *Humanities & Social Sciences Communications*, 2. <https://doi.org/10.1057/s41599-024-04014-0>

Tran, L. (2023). A Rising Trend In Eco-friendly Products: A Health-Conscious. *Heliyon*, 2-3. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19845>

Artículo Original

Distribución espacial de las zonas potenciales de Recarga Hídrica en Bolivia

Spatial distribution of potential Water Recharge zones in Bolivia

Neftalí Chapi Siñani^{1*} , Paola Alejandra Padilla Medina²  & Beatriz Liboria Canaviri Blanco¹ 

*Autor de Correspondencia: nefchapi@gmail.com

¹ Ministerio de Medio Ambiente y Agua. La Paz – Bolivia.

² Fondo Nacional de Desarrollo Integral, Ministerio de Desarrollo Rural y Tierras. La Paz - Bolivia.

Recibido: 08/12/2024 Aceptado para publicación: 15/05/2025 Publicado: 30/12/2025

Resumen

En Bolivia, el agua es esencial y un punto clave para el desarrollo; la Constitución Política del Estado la considera un derecho básico. Las leyes N°1333 y N°300 refuerzan su protección, conservación de zonas de recarga y cabeceras de cuenca. Pese a que los municipios han normado su resguardo bajo autonomía de acuerdo a la Ley N°031, aún no existe una zonificación nacional, lo que limita la planificación y gestión de aguas subterráneas. Bajo este marco, el estudio delimitó las Zonas Potenciales de Recarga Hídrica (ZPRH) a escala nacional mediante SIG y teledetección, apoyados en un análisis multicriterio, a través del método de Proceso Analítico Jerárquico. Se evaluaron nueve variables en formato rejilla, revisando que no estuvieran altamente correlacionadas. Los factores que más influyeron fueron la hidrogeología, la precipitación y la capacidad del suelo para retener agua. Se generaron dos modelos de distribución espacial de las ZPRH, con y sin precipitación, que al compararlos se evidenció una redistribución lógica de clases, donde la inclusión climática reduce áreas de muy alto y alto potencial e incrementa clases media, baja y muy baja en zonas con déficit de lluvia, introduciendo sensibilidad espacial y temporal consistente con la hidrología. El análisis a nivel estacional de la precipitación (DEF, MAM, JJA, SON) reveló dinámicas de expansión y contracción de clases muy alta y alta más notorias en verano, especialmente en Amazonas y Llanuras del Beni, mientras que el Altiplano y parte del Chaco mostraron menos recarga debido a la poca lluvia, en contraste en la Chiquitania esta limitación se debe a la geología de baja permeabilidad.

Palabras clave: ZPRH, recarga, precipitación, Proceso Analítico Jerárquico.

Abstract

In Bolivia, water is essential and a key element for development; the Political Constitution of the State considers it a basic right. Laws No. 1333 and No. 300 reinforce its protection and the conservation of recharge zones and headwaters. Although municipalities have regulated their protection under autonomy (Law No. 031), there is still no national zoning, which limits the planning and management of aquifers. Within this framework, the study delineated Potential Water Recharge Zones (PWRZs) at the national level using GIS and remote sensing, supported by a multi-criteria analysis through the Analytic Hierarchy Process (AHP). Nine variables were evaluated in a grid format, ensuring they were not highly correlated. The most influential factors were hydrogeology, precipitation, and soil water retention capacity. Two spatial distribution models of the ZPRH (Zones with and without precipitation) were generated. Comparing them revealed a logical redistribution of classes, where the inclusion of climate reduces areas of very high and high potential and increases medium, low, and very low classes in areas with rainfall deficits, introducing spatial and temporal sensitivity consistent with hydrology. The seasonal analysis of precipitation (DEF, MAM, JJA, SON) revealed expansion and contraction dynamics of very high and high classes, more pronounced in summer, especially in Amazonas and the Beni Plains. Meanwhile, the Altiplano and part of the Chaco showed less recharge due to low rainfall. In contrast, in the Chiquitania region, this limitation is due to the low-permeability geology.

Keywords: ZPRH, recharge, precipitation, Analytic Hierarchy Process.

Introducción

El agua es un recurso natural fundamental en el desarrollo sostenible y constituye un gran reto, en relación con las acciones de manejo y conservación (Díaz-Pulido et al., 2009). La Constitución Política del Estado (2009) establece que el agua constituye un derecho primordial para la vida, donde el Estado promoverá el uso y acceso al agua sobre la base de principios de solidaridad, complementariedad, reciprocidad, equidad, diversidad y sustentabilidad. Además de regular el manejo y gestión sustentable de los recursos hídricos.

La Ley N° 1333 del Medio Ambiente (1992) dispone que su protección y conservación es tarea esencial del Estado y la sociedad. La Ley N° 300 Marco de la Madre Tierra (2012) establece que se debe promover la conservación y protección de las zonas de recarga hídrica, cabeceras de cuenca, franjas de seguridad nacional del país y áreas con alto valor de conservación. En este marco, en los últimos años los Gobiernos Autónomos Municipales en base a sus competencias establecidas en la Ley N° 031 Marco de Autonomías y Descentralización (2010) han venido promulgando leyes municipales respecto a la conservación y protección de zonas potenciales de recarga hídrica.

Peñuela y Carrillo (2013), AGRECOLANDES (2020) y Chamorro-Castillo (2016), señalan que las zonas de recarga hídrica son áreas donde las características del terreno como suelos permeables, baja pendiente, presencia de fracturas/lineamientos, vegetación y aporte de precipitación, ayudan a la infiltración vertical que alimenta acuíferos. A nivel nacional, el territorio se caracteriza principalmente por una alta variabilidad climática, topográfica, de suelos, áreas con alta densidad de cobertura, como bosques, y áreas con baja densidad, como pastizales, matorrales, vegetación dispersa y/o escasa, además de la presencia de acuíferos.

Bajo este contexto, si bien se ha avanzado a nivel nacional y municipal en la parte normativa respecto a la protección y conservación de zonas de recarga hídrica, aún no se cuenta con una zonificación a escala nacional que integre de manera sistemática diferentes variables territoriales para identificar su potencialidad. Esta limitación persiste pese a tener un mapa hidrogeológico, el cual identifica áreas de agua subterránea (SERGEOMIN, 2002).

La ausencia de esta información limita una adecuada planificación hídrica, ordenamiento territorial y gestión eficiente de recursos hídricos superficiales y subterráneos. Conocer las diferentes zonas potenciales y su nivel de prioridad resulta fundamental para prevenir actividades que comprometan su integridad; procesos como la deforestación, agricultura intensiva con uso de agroquímicos, expansión urbana que reducen la infiltración y sobreexplotación de acuíferos en zonas prioritarias de alta recarga. De esta forma, una adecuada zonificación permitirá prevenir determinadas actividades, así como garantizar la disponibilidad futura de agua, tanto para consumo, como para procesos productivos.

Materiales y métodos

Determinación de Zonas Potenciales de Recarga Hídrica

Existen diferentes metodologías que integran variables como litología, pendiente, suelos, cobertura del suelo, densidad de drenaje, precipitación, entre otras, para identificar Zonas Potenciales de Recarga Hídrica (ZPRH), utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG) y procesos de Teledetección, documentados en estudios como Hsin-FU et al., 2016; IDEAM, 2025; AGRECOLANDES, 2020; CATIE, 2009; Meng et al., 2024; Kaewdum & Chotpantarat, 2016. Con base a estos estudios se definió la siguiente secuencia de pasos para identificar las ZPRH a escala nacional.

- Identificación de variables determinantes que tienen efectos en la recarga hídrica.
- Análisis de correlación para detectar variables altamente correlacionadas.
- Aplicación de análisis multicriterio basado en el Proceso Analítico Jerárquico (AHP -Analytical Hierarchy Process-), que a su vez se divide en los siguientes pasos:
 - Determinación de pesos a las variables seleccionadas mediante la escala de valoración Saaty.
 - Evaluación de la consistencia de pesos asignados, a través de la relación de consistencia.
 - Establecimiento de un modelo de combinación lineal, integrando las diferentes variables y pesos asignados.
- Normalización de variables territoriales mediante el método “min-max” con la finalidad de estandarizar a un mismo rango [0,1].
- Integración de variables territoriales normalizadas a través del modelo de combinación lineal determinado en AHP.

Variables determinantes en la recarga hídrica

Se seleccionaron un total de nueve variables territoriales que tienen efectos en la recarga hídrica, los cuales se especifican en la [Tabla 1](#) y [Figura 1](#).

Evaluación multicriterio - Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

El Proceso Analítico Jerárquico es un marco de toma de decisiones multicriterio desarrollado por Thomas L. Saaty (Saaty, 1987). Se considero este método puesto que integra procesos tanto cuantitativos como cualitativos, dentro una escala de medición común denominado escala de Saaty ([Tabla 2](#)), la cual determina la intensidad que tiene una variable respecto a otra, a través de comparaciones pareadas.

Una vez realizada la asignación de intensidades a las diferentes variables, se procedió a determinar los estadísticos de Índice de Consistencia (IC), el Índice de Consistencia Aleatoria (RI -Random Index-) y la Razón de Consistencia (RC), con el fin de evaluar la coherencia de

las intensidades asignadas dentro una matriz cruzada. Se considera que una matriz es consistentemente aceptable cuando $RC \leq 0.1$. Si se cumple el supuesto, los pesos (w) que se obtuvieron de la matriz cruzada respecto a un vector normalizado “ z ” serán los que se utilizarán para una combinación al momento de identificar las ZPRH.

Índice de Consistencia (IC)

CI = (lambda_max - n) / (n - 1)

Donde:

lambda_max= Valor propio máximo derivado de la matriz de comparaciones pareadas (A) que permite calcular un vector de pesos (w), y que posteriormente se normalizara para obtener un vector z (z = A*w), a partir del cual se determinar lambda_max

n = Número de variables evaluadas.

Razón de Consistencia (RC)

RC = CI / RI

Donde:

IC = Índice de consistencia.

IR = Índice aleatorio que está en función al “n” tamaño de matriz que corresponde al número de variables utilizadas en AHP.

Valores IR:

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

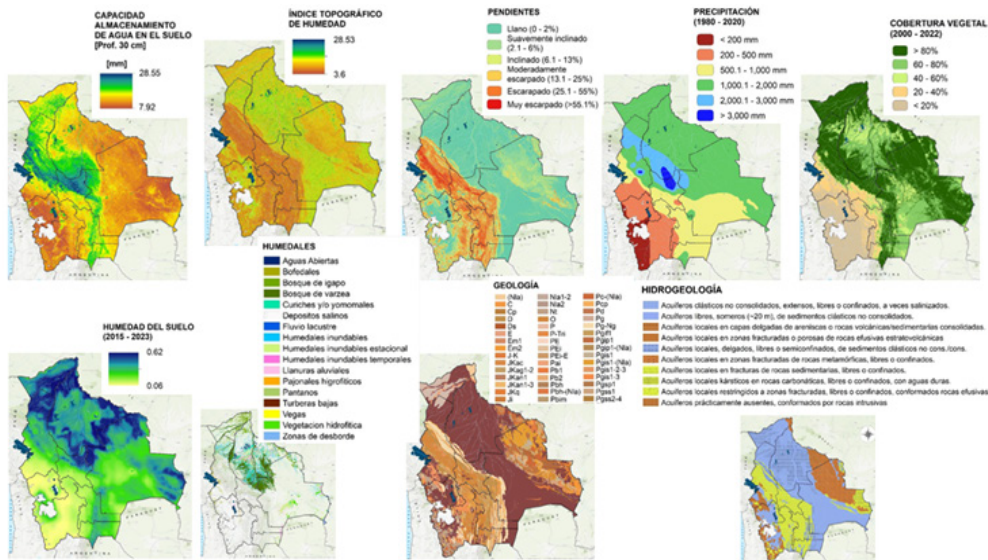


Figura 1 Distribución espacial de variables utilizadas en las ZPRH.

Normalización de variables distribuidas en rejilla espacial

Las nueve variables determinantes fueron convertidas a formato raster. Sin embargo, al corresponder a dos tipos de datos -continuas y categóricas o descriptivas-, a las variables categorías se les asigno una valoración numérica previa entre 1 a 5, con el fin de representar su nivel de importancia al momento de determinar las ZPRH (Chen, 2014; Rodríguez et al., 2016). Esta asignación numérica se basó en criterio de expertos para las variables geología (litología), hidrogeología y bofedales/humedales.

Una vez con valores mínimos y máximos para las variables continuas y categóricas, se aplicó una normalización tipo “min-max” con el propósito de escalar los datos a un rango común entre 0 y 1 (Marinho-Maciel et al., 2015). Procedimiento que fue necesario debido a que las diferentes variables presentaban distintas unidades de medida, lo que impedía su integración directa, a través de

una combinación lineal (Figura 2).

Combinación lineal ponderada

De los pesos (w) obtenidos mediante AHP para las nueve variables, estas se combinaron a través de una sumatoria lineal ponderada; proceso que se realizó mediante álgebra de mapas, lo cual permitió integrar las variables de rejilla normalizada, a partir de la siguiente expresión:

ZPRH = sum_{j=1}^7 Wj * Sj

Donde:

ZPRH = Zonas potenciales de recarga hídrica que muestra la potencialidad de cada rejilla (pixel) para favorecer el proceso de recarga de acuíferos.

Wj = Peso individual de cada variable obtenido

mediante AHP.

Sj = Variable normalizada en rejilla.

El raster resultante de las ZPRH fue reclasificado en cinco clases (muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto) utilizando el método de cuantiles (quantile), el cual permite distribuir de manera equitativa el número de píxeles en

cada clase. Esto resulta útil cuando los valores del raster presentan distribuciones sesgadas o concentradas en rangos específicos, ya que evita que algunas clases queden sobre-representadas y otras casi vacías o con pocos píxeles, un problema frecuente en métodos alternativos de dispersión de datos.

Tabla 1. Variables utilizadas para determinar las ZPRH.

Variable	Unidad	Fuente
Capacidad de almacenamiento de agua en el suelo (profundidad de 30 cm).	mm	En base a la aplicación de una ecuación de pedotransferencia, a partir de variables en rejilla de textura del suelo, materia orgánica, carbono orgánico y densidad aparente del SoilGrids de la ISRIC WorldSoil (https://soilgrids.org/).
Índice Topográfico de Humedad (ITH o TWI - Topographic Wetness Índices-)	adimensional	Derivado del Modelo de Elevación Digital MERIT Hydro (https://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/).
Pendiente	%	Derivado del Modelo de Elevación Digital MERIT Hydro (https://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/).
Precipitación	mm	Derivado de la rejilla espacial GMET (Gridded Meteorological Ensemble Tool) con promedio de data de 30 años (MMAyA, 2024).
Cobertura de vegetación	%	Derivado del producto MODIS índice de vegetación (MYD13A3)
Geología	litológica	Proveniente del Servicio Nacional de Geología y Técnico de Minas (SERGEOTECMIN, 2000).
Hidrogeológico	acuífero	Proveniente del Servicio Nacional de Geología y Técnico de Minas (SERGEOMIN, 2002).
Humedales / Bofedales	clases	En base a CIFOR (2017), Vegetación de Navarro & Ferreira (2007), MMAyA (2023).
Humedad del suelo	adimensional	En base a producto L3 (L-band / ascendente-descendente) de SMAP (https://data.nasa.gov/dataset/smap-l3-radiometer-global-daily-36-km-ease-grid-soil-moisture-v009).

Resultados

Con el fin de evitar la multicolinealidad (alta correlación, indicativo de existencia de información redundante), se evaluaron las nueve variables seleccionadas mediante el coeficiente de correlación de Pearson. Los resultados evidenciaron que ninguno de los coeficientes presentaron una correlación alta ($r \geq 0.8$) con respecto a las demás, lo que indica que cada una aporta información distinta y complementaria al momento de zonificar (Figura 3).

Al no tenerse variables altamente correlacionadas se incluyó a todas en el proceso de valoración mediante el método AHP (comparación pareada) para posteriormente

obtener los pesos correspondientes (Tabla 3 y 4).

Los pesos asignados a las diferentes variables fueron evaluados en su conjunto mediante la razón de consistencia. Los resultados obtenidos indicaron que los pesos definidos cumplen con los criterios de consistencia aceptables, lo que afirma que han sido correctamente estimados y que son adecuados para la delimitación de las ZPRH (Tabla 5 y 6).

A partir de los pesos validados, se estableció la relación final de integración de las variables, mediante el método de combinación lineal ponderada. El modelo para determinar espacialmente las ZPRH se muestra en la ecuación 1.

Ecuación 1

$$ZPRH = 0.19*CA + 0.1*ITH + 0.07*PEN + 0.19*PCP + 0.06*CV + 0.09*GEO + 0.2*HGEO + 0.05*HB + 0.05*HS$$

Donde:

CA = Capacidad de almacenamiento agua en el suelo.

ITH = Índice Topográfico de Humedad.

PEN = Pendiente.

PCP = Precipitación.

CV = Cobertura de vegetación.

GEO = Geológico.

HGEO = Hidrogeológico.

HB = Humedales/Bofedales.

HS = Humedad del suelo.

Con la finalidad de separar el efecto intrínseco del suelo (capacidad de almacenamiento y humedad), la topografía, la cobertura, la geología, la hidrogeología y la presencia de humedales/bofedales respecto a la influencia de la precipitación, se formuló la Ecuación 2, que cuantifica el potencial de estas características como variables determinantes de la recarga, de forma independiente

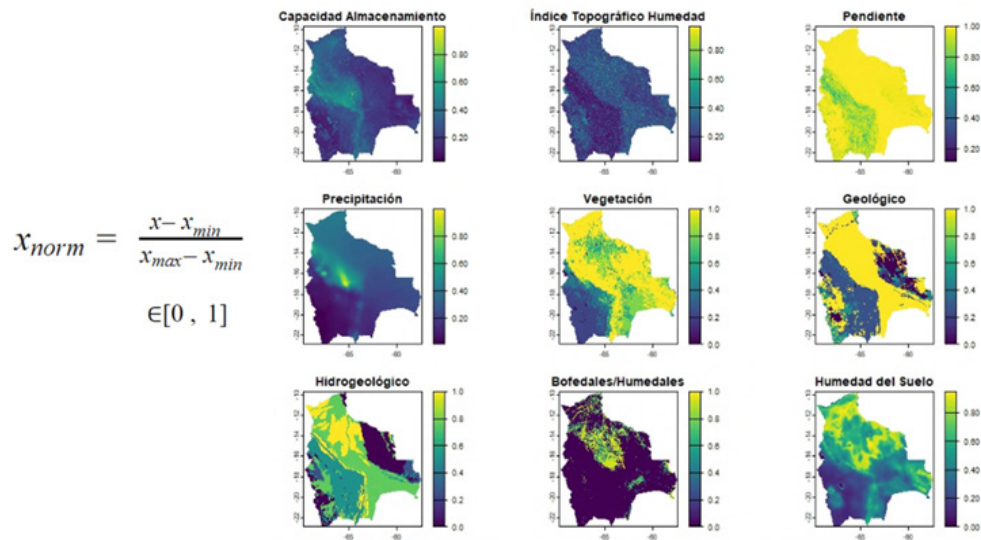


Figura 2 Normalización de variables en rejilla espacial.

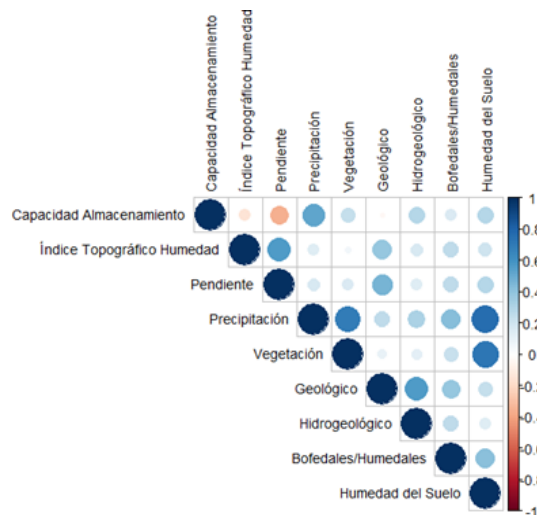


Figura 3 Gráfica de correlación de variables utilizadas en las ZPRH

Tabla 2. Escala de Intensidad de valoración de acuerdo con Saaty.

Intensidad	Definición
1	De igual importancia
3	Moderada importancia
5	Importancia fuerte
7	Muy fuerte o demostrada
9	Extrema
2,4,6,8	Valores intermedios
Recíprocos	$a_{ij}=1/a_{ji}$

Tabla 3. Matriz cruzada de valoración pareada.

Variables	Capacidad de Almacenamiento	Índice Topográfico de Humedad	Pendiente	Precipitación	Cobertura Vegetal	Geológico	Hidrogeológico	Bofedales / Humedales	Humedad del Suelo
Capacidad Almacenamiento	1	2	3	1	3	2	1	4	4
Índice Topográfico de Humedad	1/2	1	2	1/2	2	1	1/2	2	2
Pendiente	1/3	1/2	1	1/3	1	2	1/3	1	1
Precipitación	1	2	3	1	3	2	1	4	4
Cobertura Vegetal	1/3	1/2	1	1/3	1	1	1/3	1	1
Geológico	1/2	1	2	1/2	1	1	1/2	2	2
Hidrogeológico	1	2	4	1	3	2	1	4	4
Bofedales / Humedales	1/4	1/2	1	1/4	1	1/2	1/4	1	1
Humedad del Suelo	1/4	1/2	1	1/4	1	1/2	1/4	1	1

Tabla 4 Matriz normalizada por columna.

Variables	Capacidad de Almacenamiento	Índice Topográfico de Humedad	Pendiente	Precipitación	Cobertura Vegetal	Geológico	Hidrogeológico	Bofedales / Humedales	Humedad del Suelo	Peso ω
Capacidad Almacenamiento	0.19	0.20	0.17	0.19	0.19	0.17	0.19	0.20	0.20	0.19
Índice Topográfico de Humedad	0.10	0.10	0.11	0.10	0.13	0.08	0.10	0.10	0.10	0.10
Pendiente	0.06	0.05	0.06	0.06	0.06	0.17	0.06	0.05	0.05	0.07
Precipitación	0.19	0.20	0.17	0.19	0.19	0.17	0.19	0.20	0.20	0.19
Cobertura Vegetal	0.06	0.05	0.06	0.06	0.06	0.08	0.06	0.05	0.05	0.06
Geológico	0.10	0.10	0.11	0.10	0.06	0.08	0.10	0.10	0.10	0.09
Hidrogeológico	0.19	0.20	0.22	0.19	0.19	0.17	0.19	0.20	0.20	0.20
Bofedales / Humedales	0.05	0.05	0.06	0.05	0.06	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05
Humedad del Suelo	0.05	0.05	0.06	0.05	0.06	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05

Tabla 5 Variables y valores λ_{max} .

Variables de las ZPRH	Valor Z	Valor ω	Valor Z/ ω
Capacidad Almacenamiento	1.76	0.19	9.30
Índice Topográfico de Humedad	0.94	0.10	9.35
Pendiente	0.66	0.07	9.47
Precipitación	1.76	0.19	9.30
Cobertura Vegetal	0.57	0.06	9.37
Geológico	0.88	0.09	9.39
Hidrogeológico	1.83	0.20	9.37
Bofedales / Humedales	0.47	0.05	9.35
Humedad del Suelo	0.47	0.05	9.35

Tabla 6 Relación de consistencia del vector de pesos (w).

Estadístico	Valor
CI	0.045
RI	1.45
RC	0.031
RC < 0.1 [Consistente]	

a las fluctuaciones temporales de la precipitación. Este tipo de enfoque es valioso porque distingue entre lo que depende del clima (temporal y variable) y lo que depende de la configuración física del territorio (más estable en el tiempo).

Ecuación 2

$$ZPRH = 0.19*CA + 0.1*ITH + 0.07*PEN + 0.06*CV + 0.09*GEO + 0.2*HGEO + 0.05*HB + 0.05*HS$$

De esta forma, al separar la variable clima, es posible identificar con mayor precisión las áreas que, por su condición física y estructural, tienen mayor capacidad natural de generar recarga aun cuando las precipitaciones sean intensas, moderadas o escasas (Hernández-Juárez et al., 2020). Estudios y herramientas de balance suelo-agua documentan la ventaja de separar los efectos climáticos de los atributos físicos del terreno para obtener una interpretación más estable y transferible de la capacidad de recarga espacial (USGS, 2018).

Al aplicar las Ecuaciones 1 y 2 se obtuvieron dos mapas de las ZPRH. El primero integra el efecto de la influencia climática y permite valorar el comportamiento general de la recarga bajo las condiciones climáticas registradas y para análisis a escala regional donde interesa cuantificar

el aporte climático (Figura 4). El segundo representa el potencial intrínseco, destacando la aptitud física superficiales y subterráneas para recibir y retener agua, aunque las lluvias sean moderadas o escasas, por lo que es útil al momento de identificar áreas óptimas para medidas de recarga artificial o intervenciones de manejo del suelo (Figura 5).

De la información en rejilla de los mapas se derivó la tabla 7 que permite comparar la distribución porcentual y en extensión territorial (Km²) de las distintas clases de las ZPRH. Esta comparación facilita identificar los cambios en superficie del potencial de recarga hídrica asociados a la influencia de la precipitación.

La inclusión de la precipitación en las ZPRH redistribuye las superficies de las diferentes clases, donde las clases muy alto y alto presentan una disminución total de 72,500 km², correspondiendo 60,442 km² a muy alto y 12,085 km² a alto. Contrariamente las clases medio, bajo y muy bajo aumentan sus superficies, medio en 28,563 km², bajo en 19,774 km² y muy bajo en 25,276 km².

Estos valores reflejan la sensibilidad de la ZPRH respecto a la variable precipitación, cuya inclusión introduce una respuesta más consistente con la lógica

hidrológica. Esto se debe a que la recarga hídrica no solo depende de la capacidad intrínseca del terreno para almacenar, infiltrar y percolar agua, sino también de la disponibilidad efectiva de aportes pluviales en relación con el volumen de agua disponible en las diferentes clases.

Con la finalidad de comprender mejor esta sensibilidad frente a la precipitación, pero no solo en términos espaciales sino también temporales, se optó por desagregar el dato anual a nivel estacional: verano (diciembre, enero y febrero -DEF-), otoño (marzo, abril y mayo -MAM-), invierno (junio, julio y agosto -JJA-) y primavera (septiembre, octubre y noviembre -SON-), esto con la finalidad de representar la recarga hídrica como un proceso hidrodinámico y no como un fenómeno estático anual. Asimismo, para identificar posibles patrones territoriales en la distribución de las clases ZPRH, se desagregó también a nivel de macroregiones con la finalidad de analizar la respuesta diferenciada de la recarga efectiva si la disponibilidad pluvial es marcadamente estacional (Figura 6).

La figura evidencia una variabilidad en la distribución espacial y estacional (temporal) de la precipitación, con un máximo en verano (DEF) y una prolongada estación

seca durante el resto del año (MAM, JJA, SON). Esta estacionalidad explica los cambios en la distribución territorial de las diferentes clases ZPRH, que muestra una dinámica de expansión y contracción más acentuada en las clases muy alto, alto y medio durante la época lluviosa. Las variaciones más pronunciadas se observan en las macroregiones del Amazonas, Llanuras y Sabanas del Beni y Chaco, donde las recargas están fuertemente condicionadas por la disponibilidad de aportes pluviales estacionales.

En el resto de macroregiones, la dinámica estacional de las clases ZPRH se resume en tres comportamientos principales: i) descenso de clases en áreas con alto potencial intrínseco, pero limitada por déficit de lluvia, reduciendo su recarga promedio, en el Chaco, Valles, Llanuras y Sabanas del Beni; ii) ascenso de clase en áreas de potencial medio cuando la disponibilidad hídrica es suficiente como en los Yungas Chapare; y iii) persistencia en áreas más resilientes, como la Amazonia, donde el potencial intrínseco del suelo y la precipitación permite una recarga sostenida, debido a una menor dependencia de las variabilidad climática estacional.

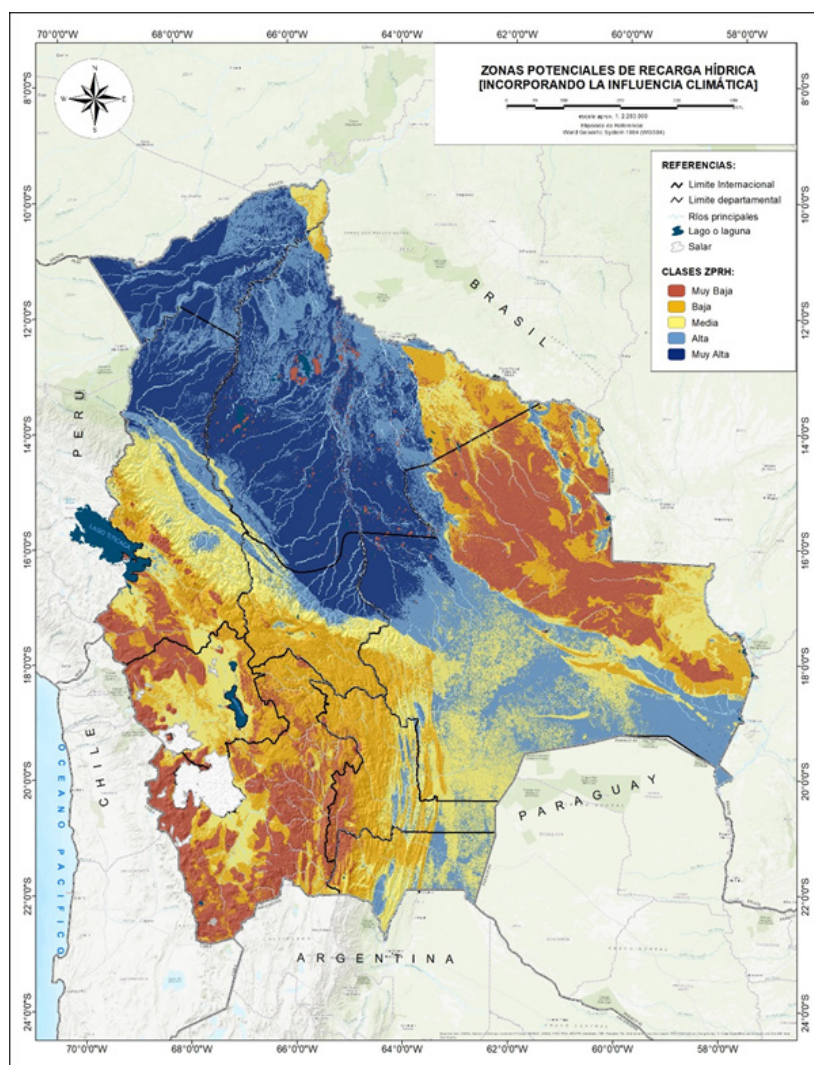


Figura 4. Mapa de ZPRH incorporando la influencia climática (precipitación).

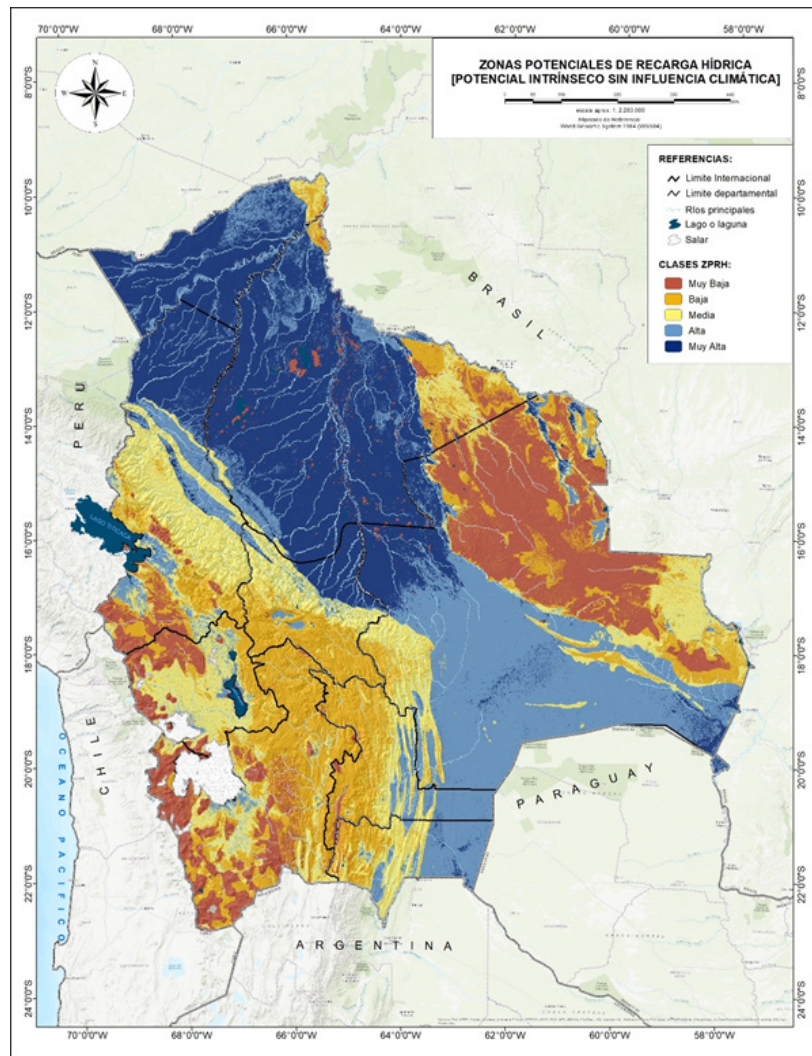


Figura 5. Mapa de ZPRH solo potencial intrínseco sin influencia climática (precipitación).

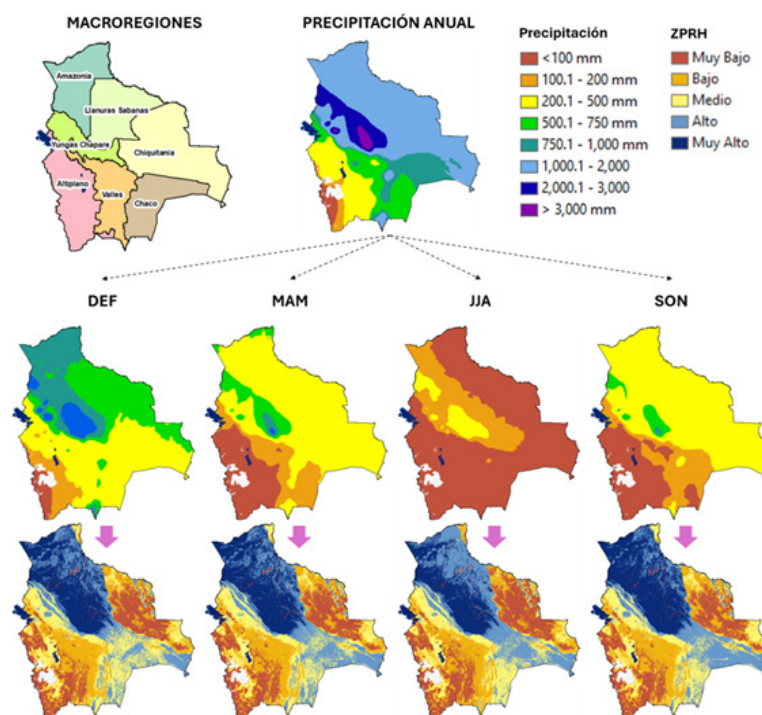


Figura 6. Efecto de la distribución espacial y estacional de la precipitación sobre las ZPRH.

Por otra parte, en la macroregion del Altiplano, la recarga presenta mayor superficie en clases media, baja y muy baja, incluso en áreas donde las condiciones físicas y geológicas del terreno son relativamente favorables para la infiltración y percolación. Sin embargo, la recarga efectiva se ve limitada por la escasa disponibilidad pluvial, que se intensifica en el sector centro-sur del Altiplano, donde predomina una mayor aridez y elevadas pérdidas por evapotranspiración. En contraste, el norte del Altiplano presenta un comportamiento de recarga más favorable asociado a una mayor pluviosidad estacional, y mejor condición intrínseca del terreno en comparación al resto de la región.

En la macroregion de la Chiquitania, también se tiene una mayor concentración de superficies en clases como media y baja, pese a la presencia de lluvias moderadas durante la estación de verano en comparación con el Altiplano. Esto se debe a la presencia del Escudo Precámbrico Brasileño, el cual es un basamento cristalino de baja permeabilidad compuesto principalmente por granitos, gneises y rocas metamórficas altamente consolidadas, que reduce la infiltración profunda y limita la conexión hidráulica hacia los acuíferos subyacentes (Gardi et al., 2014). En este sentido, la recarga se ve limitada y altamente condicionada a la geología, donde la porosidad es mínima y la infiltración y percolación depende de la presencia de fracturas (Mautner, M., & Esobar, M., 2022). En cambio, donde predominan suelos permeables y acuíferos aluviales (p.e. llanos amazónicos o planicies aluviales), el agua infiltrada y que percola es mayor.

Discusión

La ausencia de multicolinealidad entre las variables (ninguna con $r \geq 0.8$) indica que cada factor aporta información complementaria, como recomiendan estudios de zonificación hídrica. De esta forma las nueve variables fueron incluidas dentro del AHP, cuyas ponderaciones resultantes fueron internamente consistentes, teniéndose una razón de consistencia muy baja ($CR=0.03$), cumpliendo el umbral aceptable ($CR < 0.1$) y confirmando la coherencia de la matriz pareada (Radulović et al., 2022; Chen et al.,

2025). Esto valida que los pesos estimados son confiables para caracterizar las ZPRH según análisis multicriterio aplicado.

Los pesos derivados ubican a la precipitación (PCP) y a la variable hidrogeológica (HGEO) entre los más influyentes ($w = 0.19$ y 0.20), seguidos por la capacidad de almacenamiento (CA), entre otros factores. Esta jerarquía concuerda con investigaciones de otros autores, donde la precipitación suele dominar las estimaciones de recarga. En efecto, la intensidad de lluvia se reconoce frecuentemente como “factor principal” que controla la recarga hídrica (Khenmal et al., 2025; Zahra et al., 2025). Además, estudios previos han enfatizado que sin datos meteorológicos adecuados la ponderación de la precipitación puede subestimarse; nuestro análisis con datos estacionales integrados en las ZPRH muestra su papel crítico.

Al comparar el modelo completo (Ecuación 1) con la versión sin precipitaciones (Ecuación 2), se observa una redistribución lógica de las clases de ZPRH. Incluir la precipitación reduce las áreas clasificadas como muy alto o alto potencial, aumentando las clases media y baja (Tabla 7). Este efecto refleja que la recarga efectiva no sólo depende de las características intrínsecas del territorio (propiedades físicas del suelo, topografía y geología), sino también de la disponibilidad real de agua de lluvia. Estudios similares encuentran que los mapas de recarga varían marcadamente cuando se incorporan el componente climático, al ponderar la lluvia como variable dominante, las zonas de alta recarga disminuyen donde hay un déficit pluviométrico (AGRECOLANDES, 2020; Khenmal et al., 2025).

Por otra parte, el análisis estacional confirma una dinámica marcada por la época de lluvias (verano). En esta época las clases de recarga muy alta y alta se expanden, mientras que en otoño e invierno seco se contraen. Esto concuerda con la constatación de que “la precipitación es altamente estacional” en climas áridos/semiáridos (Meng et al., 2024; Guzmán-Rojo et al., 2025). Por ejemplo, en la Amazonía y zonas lluviosas los valores de recarga siguen altos la mayor parte del año, pero en el Altiplano y el Chaco las áreas inicialmente con buen potencial intrínseco

Tabla 7. Comparación de la superficie de ecuaciones 1 y 2 según sus clases de ZPRH.

Potencial de recarga		Modelo ZPRH sin precipitación		Modelo ZPRH con precipitación	
		Superficie (Km ²)	%	Superficie (Km ²)	%
Muy Bajo		183,463	16.7	208,730	19.0
Bajo		204,336	18.6	224,110	20.4
Medio		183,463	16.7	212,026	19.3
Alto		236,195	21.5	224,110	20.4
Muy Alto		290,025	26.4	229,603	20.9
TOTAL		1,098,581	100	1,098,581	100

pierden niveles de clase al caer la lluvia, esto debido a la estacionalidad de lluvias y a su menor cantidad en comparación a la Amazonia. En general se puede mencionar que la estacionalidad de las lluvias explica la expansión de las clases más altas durante el verano, como indican los patrones observados en las diferentes macroregiones.

En conjunto, los resultados se alinean con estudios recientes de zonificación de recarga que recomiendan enfoques integrados y sensibles al clima. Al tener dos mapas (con y sin precipitación) logramos distinguir la capacidad intrínseca del terreno y de la influencia climática, como aconsejan autores como (Hernández-Juárez et al., 2020; Khenmal et al., 2025). El mapa ZPRH con precipitación ofrece la evaluación realista de recarga bajo condiciones actuales, mientras el sin precipitación revela áreas con alta aptitud física para infiltración a largo plazo (útil para recarga artificial). Abordar este enfoque mejora la gestión, puesto que otros autores también resaltan la conveniencia de manejar por separado factores permanentes del terreno y fluctuaciones pluviométricas al momento de planificar la gestión de recursos hídricos (Mautner & Esobar, 2022).

Conclusiones

La precipitación, la hidrogeología y la capacidad de almacenamiento del suelo resultaron las variables más influyentes a nivel nacional en la determinación de las ZPRH, lo que concuerda con la literatura donde la recarga está fuertemente condicionada por la disponibilidad pluvial estacional y la aptitud físico-estructural del suelo y subsuelo para infiltrar y transmitir agua. Esto indica que la concentración temporal de las precipitaciones limita la eficiencia de recarga más que el total anual, sugiriendo que la gestión del recurso debe enfocarse en maximizar la retención y aprovechamiento del agua durante los períodos húmedos.

La comparación entre modelos (con y sin precipitación) evidenció una redistribución lógica de las clases ZPRH; la inclusión climática reduce las zonas de potencial muy alto y alto e incrementa clases media y baja en áreas con déficit de lluvia. Esto evidencia que la precipitación condiciona de manera significativa el comportamiento espacial del agua infiltrada. Además, permite identificar zonas con alto potencial intrínseco, pero con déficit pluviométrico, donde podrían implementarse estrategias de recarga artificial para optimizar la disponibilidad de agua subterránea.

Los patrones espaciales de las ZPRH resultantes muestran coherencia con el conocimiento hidrológico y subterráneo regional: altos potenciales en piedemonte Andino-Amazónico y en la Llanura Beniana pero bajos en Altiplano árido y parte del Chaco y Chiquitania. Lo cual proporciona validación indirecta de las clases de recarga distribuidas espacialmente, aunque requiere confirmación mediante mediciones de campo de la recarga real.

Referencias

AGRECOLANDES. (2020). Protección de áreas de recarga hídrica y fuentes de agua. <https://www.agrecolandes.org/solidagro/2020/09/22/ciclo-de-webinarios-proteccion-de-areas-de-recarga-hidrica-y-fuentes-de-agua/>

CATIE. (2009). Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica. Serie técnica. Boletín técnico no. 38. ASDI. 21p. Recuperado de: <https://cenida.una.edu.ni/reletronicos/RENPI0M433.pdf>

Chamorro-Castillo, K. M. (2016). Identificación y caracterización de las zonas de recarga hídrica mediante herramientas SIG de los acuíferos La Carbonería, Guaracapas, Yuyucocha y Santa Clara para la protección de las fuentes de aprovisionamiento de agua en la zona urbana de Ibarra. Ibarra, Ecuador. Universidad Técnica del Norte. Facultad de Ingeniería en Ciencias Agropecuarias y Ambientales. Carrera de Ingeniería en Recursos Naturales Renovables. Recuperado de: <https://revistademorfologiaurbana.org/index.php/rmu/article/view/26>

Chen, J. (2014). GIS-based multi-criteria analysis for land use suitability assessment in City of Regina. *Environmental Systems Research*, 3(13). Recuperado de: <http://www.environmentalsystemsresearch.com/content/3/1/13>

Chen, M., Zhang, S., Liu, S., Li, M., Zhang, T., Wu, T., & Bu, X. (2025). Mapping the groundwater potential zones in mountainous areas of Southern China using GIS, AHP, and fuzzy AHP. *Scientific Reports*, 15 (17159). Recuperado de: <https://www.nature.com/articles/s41598-025-01837-y#:~:text=Further%20analysis%20regarding%20multicollinearity%20among,are%20deemed%20reliable%20predictor%20variables>

Díaz-Pulido, A. P., Chingaté-Hernández, N., Muñoz-Moreno, D. P., Olaya-González, W. R., Perilla-Castro, C., Sánchez-Ojeda, F., & Sánchez-González, K. (2009). Desarrollo sostenible y el agua como derecho en Colombia [Sustainable development and the right to water in Colombia]. *Estudios Socio-Jurídicos*, 11(1), Pp: 1-18. Recuperado de: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0124-05792009000100005&script=sci_arttext

Gardi, C., Angelini, M., Barcelo, S., Comerma, J., Cruz Gaistardo, C., Encina Rojas, A., Jones, A., Krasilnikov, P., Mendonca Santos Brefin, M.L., Montanarella, L., Muniz Ugarte, O., Schad, P., Vara Rodriguez, M.I., & Vargas, R. (2014). Atlas de suelos de America Latina y el Caribe, Comision Europea - Oficina de Publicaciones de la Union Europea, L-2995 Luxembourg, 176 pp. Recuperado de: <https://share.google/skRvPjRXDd0M7CnCI>

Guzmán-Rojo, M., Pérez-Hurtado, C., & Gómez-Vargas, Z. (2025). Nationwide potential groundwater recharge trends in Bolivia: a remote sensing approach and a policy-ready decline indicator. *Environmental Research Letters*, 20(7), 14p. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ade16f>

Hernández-Juárez, R. A., Martínez-Rivera, L. M., Peñuela-Arévalo, L. A., & Rivera-Reyes, S. (2020). Identificación de zonas potenciales de recarga y descarga de agua subterránea en la cuenca del río Ayuquila-Armería mediante el uso de SIG y el análisis multicriterio. *Investigaciones Geográficas*, (101), 19p. <https://doi.org/10.14350/rig.59892>

Hsin-Fu, Y., Youg-Sin Ch., Hung-I, L. & Cheng-Haw L. (2016). Mapping groundwater recharge potential zone using a GIS approach in Hualian River, Taiwan. *Sustainable Environment Research*. Volume 26, Issue 1, January 2016, pp: 33-43. <https://doi.org/10.1016/j.serj.2015.09.005>

IDEAM. (2025). Guía Metodológica para la Identificación de Zonas Potenciales de Recarga de Acuíferos. Servicio Geológico Colombiano. 143p. Recuperado de: <https://www.andi.com.co/Uploads/Guia%20Metodologia%20para%20recarga%20de%20acuíferos..pdf>

Kaewdum, N. & Chotpanarat, S. (2016). Mapping Potential Zones for Groundwater Recharge Using a GIS Technique in the Lower Khwae Hanuman Sub-Basin Area, Prachin Buri Province, Thailand. *Earth Sci. Sec. Hydrosphere*. Volumen 9. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.717313>

Khenmal, H. Y., Hani, A., & Benmarcé, K. (2025). Exploring groundwater recharge potential zones mapping in the northern upper Boussellam region: A novel approach integrating TDS levels. *Applied Water Science*, 15(103). <https://doi.org/10.1007/s13201-025-02413-5>

Maciel, F., & Zampieri, F. (2018). Atributos morfológicos configuracionais e copresença em loteamentos residenciais dispersos de cidades médias brasileiras [Configurational morphological attributes and copresence in dispersed residential subdivisions in medium-sized Brazilian cities]. Recuperado de: <https://revistademorfologiaurbana.org/index.php/rmu/article/view/26>

Mautner, M., & Esobar, M. (2022). Chiquitania rural water supply:

Considering decentralized water infrastructure and land use change in hydrologic analysis (SEI Factsheet). Stockholm Environment Institute. 6p. Recuperado de: <https://www.sei.org/wp-content/uploads/2022/01/220122a-burton-mautner-atajados-fact-sheet-2114b.pdf#:~:text=the%20Chiquitano%20dry%20forest%20lies,variable%20and%20hard%20to%20characterize>

Meng, F., Khan, M. I., Naqvi, S. A. A., Sarwar, A., Islam, F., Ali, M., Tariq, A., Ullah, S., Soufan, W., & Faraj, T. K. (2024). Identification and mapping of groundwater recharge zones using multi influencing factor and analytical hierarchy process. *Scientific Reports*, 14, 19240. Recuperado de: https://www.nature.com/articles/s41598-024-70324-7?error=cookies_not_supported&code=b36ada28-a098-4e32-b609-b3eff03219fc#:~:text=Groundwater%20results%20from%20the%20interaction,source%20of%20freshwater%20supply%2027

Peñuela Arévalo, L. A., & Carrillo Rivera, J. J. (2013). Definición de zonas de recarga y descarga de agua subterránea a partir de indicadores superficiales: centro-sur de la Mesa Central, México. *Investigaciones Geográficas*, (81), 18-32. Recuperado de: <https://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n81/n81a3.pdf>

Radulović, M., Brdar, S., Mesaros, M., Lukić, T., Savić, S., Basarin, B., Crnojević, V., & Pavić, D. (2022). Assessment of groundwater potential zones using GIS and fuzzy AHP techniques—A case study of the Titel Municipality (Northern Serbia). *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11(4). 257p. <https://doi.org/10.3390/ijgi11040257>

Rodríguez, J. P., Suazo, Á., & Santelices, I. (2016). Análisis por medio de la normalización de variables para un modelo de planificación ambiental hídrica estacional [Analysis by means of variable normalization for a model of seasonal water environmental planning]. *Obras y Proyectos*, (20), 56-65. <https://doi.org/10.4067/S0718-28132016000200006>

Saaty, R. W. 1987. Analytic Hierarchy Process. *Mathematical Modelling*. Vol. 9, Nro. 3-5. [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8)

Servicio Geológico Minero (SERGEOMIN). (2002). Mapa Hidrogeológico de Bolivia. ESCALA 1:1.000.000. Recuperado de: <http://ide.sergeomin.gob.bo/hglgsgm/>

U.S. Geological Survey. (USGS). (2018). SWB—A Modified Thornthwaite-Mather Soil-Water-Balance Code for Estimating Groundwater Recharge (Techniques and Methods 6-A61). Reston, VA. Techniques and Methods 6-A31. Chapter 31. 72p. Recuperado de: <https://pubs.usgs.gov/tm/tm6-a31/tm6a31.pdf>

Zahra, H., Sajjad, A., Sajid, S. H., Iqbal, M., & Khan, A. H. A. (2025). Identification of groundwater recharge potential zones in Islamabad and Rawalpindi for sustainable water management. *Water*, 17(23), 3392p. <https://doi.org/10.3390/w17233392>

Artículo de Revisión

Desmitificando el uso de polvo de roca para la agricultura : un estudio de caso en Brasil

Demystifying the use of rock dust for agriculture: a case study in Brazil

Cristiano De Angelis ^{1*} 

*Autor de Correspondencia: cristianodeangelis@proton.me

¹Investigador independiente, Skema Business School, Francia.

Recibido: 24/08/2024 Aceptado para publicación: 20/12/2025 Publicado: 30/12/2025

Resumen

La meteorización mejorada de rocas terrestres (ERW) es una tecnología prometedora para la eliminación de dióxido de carbono que implica la aplicación de rocas de silicato molidas, como el basalto, a suelos agrícolas. Sin embargo, los investigadores critican la falta de estudios, en particular estudios físicos y biológicos de las rocas, para verificar si realmente benefician la nutrición del suelo. Las ventajas de la reducción de la lixiviación y el aumento de calcio, hierro (Fe), aluminio (Al) y magnesio (Mg) deben sopesarse frente a los efectos negativos, como las pérdidas de CO₂ por la mineralización de la materia orgánica, la sodificación y la respiración del suelo. La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) descubrió que, entre 21 países encuestados en 2024, Brasil es el que más cree en las noticias falsas. Esto puede estar relacionado con una encuesta del Consejo Sur de Brasil (datos de 2000) que encontró que, mientras que los brasileños leen, en promedio, un libro por año, los chilenos, uruguayos y argentinos leen cuatro libros en el mismo período. La agricultura es el motor de la economía latinoamericana, ya que carecen del deseo o acceso al conocimiento y, por lo tanto, el control de Estados Unidos sobre los precios de los productos agrícolas llevó a la caída de la presidenta Dilma Rousseff (intercambiando huevos por pollos). Ahora, bajo el liderazgo de Lula, las importaciones de fertilizantes químicos de Rusia superaron a las de India y China en 2024 (R\$19.98 mil millones), lo que ha preocupado enormemente a los investigadores del Servicio Geológico Brasileño (SGB). Se proyecta que Brasil importará el 83% de las materias primas necesarias para producir fertilizantes para 2025 (frente al 65% en 2023-2024). En este escenario adverso, propicio para un milagro económico, el polvo de roca emerge como un posible sustituto de los fertilizantes químicos, como si pudiera cambiar la cultura y la tasa de analfabetismo en las zonas rurales (26% frente al 9% en las zonas urbanas), lo que contradice los datos nacionales (30 millones de brasileños son analfabetos funcionales). En este contexto, este trabajo propone dos modelos: 1. Un modelo de Cultura-Conocimiento-Inteligencia para comprender cómo las cuestiones culturales impactan los procesos de creación y aplicación del conocimiento en la agricultura; y 2. Un modelo de agricultura biodinámica (fertilizantes caseros como el polvo de roca) basado en cooperativas para mejorar las técnicas locales en la agricultura brasileña.

Palabras clave: agricultura biodinámica, cooperativas agrícolas; gestión del conocimiento, milagro económico, polvo de roca.

Abstract

Terrestrial enhanced rock weathering (ERW) is a promising technology for carbon dioxide removal that consists of the application of ground silicate rocks, such as basalt, to agricultural soils. However, researchers criticize the lack of studies, mainly physical and biological studies of the rocks, in order to verify whether they really benefit soil nutrition, since the advantages of reduced leaching and increased calcium, iron (Fe), aluminum (Al) and magnesium (Mg) must be compared with the negative effects such as CO₂ losses from the mineralization of organic matter, sodification and soil respiration. The Organization for Economic Cooperation and Development (OECD) found that among 21 countries surveyed in 2024, Brazil is the one that believes the most in fake news, which may be related to a survey by the International Reading Association (Conselho Brasil Sul) - data from 2000 -, which found that while Brazilians read an average of a book per year, Chileans, Uruguayans and Argentines read 4 books in the same period. Agriculture is the driving force of the Latin economy, as they have no desire or access to knowledge, and so the control of the prices of agricultural commodities by the United States led to the fall of President Dilma (swapping chicken for eggs). Now with Lula, the import of chemical fertilizers from Russia surpassed India and China in 2024 (R\$ 19.98 billion), which has greatly worried researchers at the Brazilian Geological Survey (SGB), given the forecast that in 2025 Brazil will import 83% of the raw material needed to produce fertilizers (it was 65% in 2023-2024). In this adverse scenario and conducive to an economic miracle, rock powder emerges as a possible substitute for chemical fertilizers, as if it were capable of changing the culture and illiteracy in rural areas (26% compared to 9% in urban areas), which goes against the data at a national level (30 million Brazilians are functionally illiterate). In

Resultados

Revisión bibliográfica sobre polvo de roca

Bauwhede et al. (2024) se propusieron: (1) comparar cómo se disuelven los polvos de roca (DR) en función de su mineralogía y superficie, (2) examinar la disolución de los DR en suelos con diferentes pH iniciales y capacidades de amortiguación, y (3) evaluar pruebas que simulan la meteorización para predecir la eficacia de los DR para mejorar el pH del suelo. Probaron cinco DR disponibles comercialmente —incluyendo dos basaltos: fonolita, foidita y traquiandesita— en cuatro suelos forestales acidificados con diferentes texturas y propiedades químicas. El estudio destaca un problema clave: la acidificación del suelo está empeorando a nivel mundial, y aunque los RD de silicato se consideran un remedio potencial, su efectividad varía ampliamente debido a las diferencias en las tasas de disolución y el ANC. Estas propiedades están estrechamente relacionadas con la composición

mineral de la roca y la capacidad amortiguadora del suelo. Bauwhede et al. (2024) enfatizan la necesidad de mejores métodos de evaluación para asegurar la selección y el uso adecuados de RD en los esfuerzos de restauración del suelo. Duppa et al. (2024) observaron que la aplicación de polvo de roca tuvo una influencia de neutra a ligeramente positiva en los indicadores de fertilidad biológica del suelo. Entre los parámetros medidos, solo la abundancia de lombrices de tierra y la respiración del suelo mostraron cambios estadísticamente significativos, con un aumento de la abundancia de lombrices de tierra de un promedio del 71% en los suelos tratados después de un mes, en comparación con los controles. Se utilizó un modelo lineal mixto general para evaluar la influencia de diversos factores en la abundancia de lombrices, incluyendo la textura del suelo, el contenido de carbono orgánico del suelo (COS), el pH, la calidad estructural, la densidad aparente y la presencia de oligoelementos tóxicos. Cabe destacar que, además de los efectos del polvo de roca,

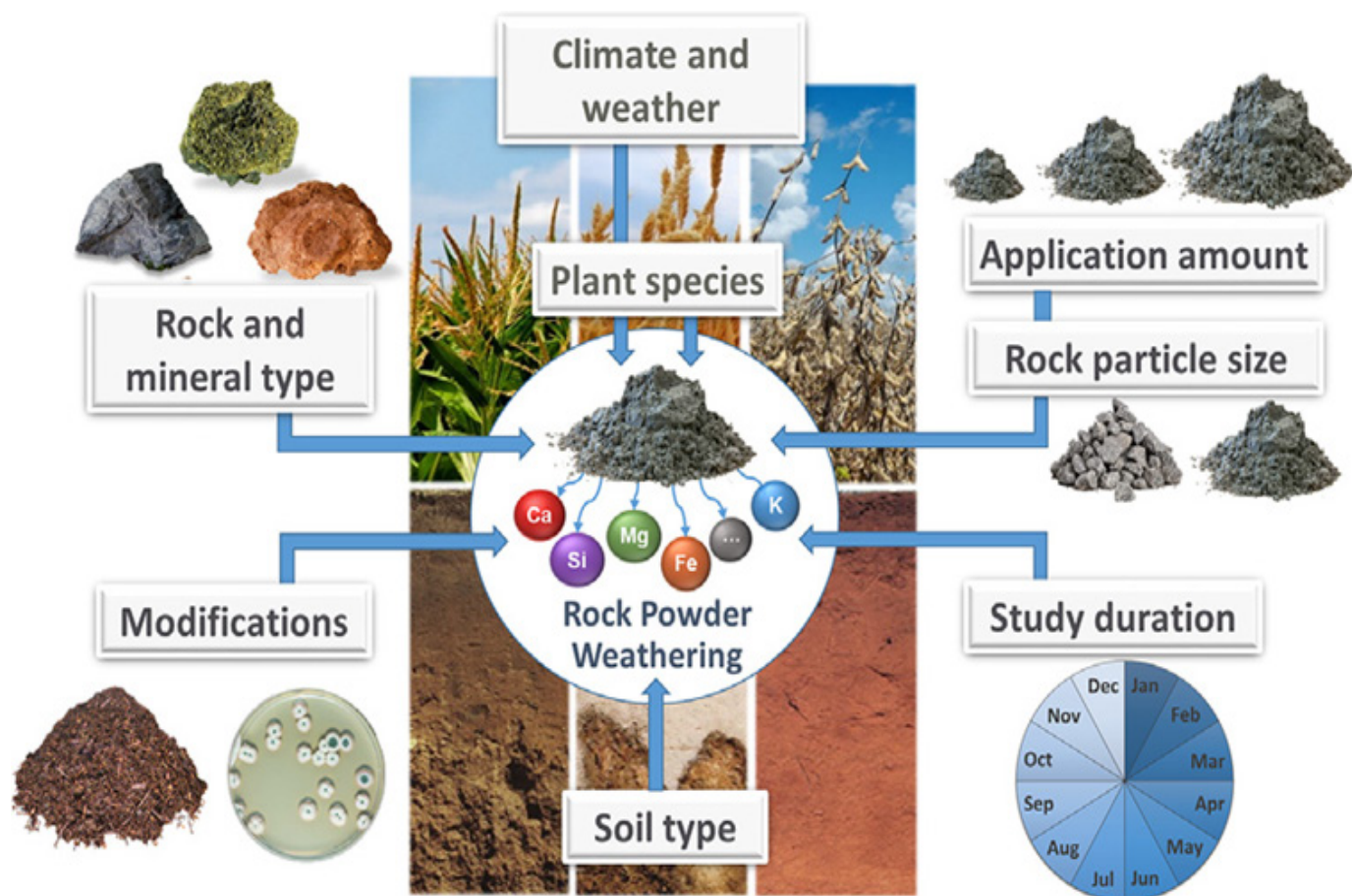


Figura 2 - Factores que influyen en el uso de polvos de roca de silicato (PRS) (Swoboda Döringb & Hamera, 2022).

los altos niveles de cobre fueron el único factor con un impacto negativo significativo en las poblaciones de lombrices. Asimismo, el polvo de roca puede mejorar propiedades del suelo como la capacidad de intercambio catiónico (Anda et al., 2015) y la capacidad de retención de agua en suelos arenosos (Kahnt et al., 1986). Sin embargo, su efectividad es inconsistente, y algunos contienen elementos potencialmente tóxicos en concentraciones perjudiciales. Por lo tanto, los resultados agronómicos de las aplicaciones de polvo de roca, especialmente en suelos tropicales, dependen en gran medida de la composición mineralógica y química específica de la roca, las deficiencias del suelo y los requerimientos nutricionales de los cultivos objetivo (van Straaten, 2017). Swoboda, Döring y Hamer (2022) analizaron 48 ensayos de cultivos y concluyeron que los polvos de roca, en particular los derivados de rocas máficas y ultramáficas, como basalto, nefelina y materiales que contienen glauconita, muestran potencial como fuentes alternativas de potasio y aditivos multinutrientes en suelos tropicales. Los polvos de basalto, en particular, se destacan por su riqueza en silicatos de magnesio y hierro y su pH básico, además de aportar nutrientes esenciales como fósforo, potasio, calcio y varios micronutrientes. Viana, Caetano y Pontes (2021) exploraron diversas técnicas para mejorar la fertilidad del suelo y descubrieron que la combinación de cantidades moderadas de polvo de basalto con dosis más altas de estiércol de ganado produjo los resultados más efectivos. Sus hallazgos sugieren que la integración de polvo de roca con fertilizantes orgánicos aumenta la disponibilidad de nutrientes y la salud del suelo de forma más eficiente que el uso exclusivo de polvo de roca.

De igual manera, Da Silva et al. (2017) destacaron que la coaplicación de polvos de roca con materiales orgánicos que estimulan la actividad biológica puede influir en el proceso de meteorización mineral. Sin embargo, también señalan una brecha en el conocimiento sobre cómo estas combinaciones afectan la disolución mineral, particularmente en polvos de roca basáltica. Durante el compostaje, el ciclo del nitrógeno es fundamental para la calidad del compost, como lo señalan Hoang et al. (2022), quienes también analizan estrategias para mitigar la pérdida de nitrógeno. Si bien algunos estudios proporcionan datos prometedores, otros carecen de una validación científica rigurosa o aplicaciones prácticas en el campo. Por ejemplo, Ramos et al. (2022) informan que la combinación de fertilizantes orgánicos con polvo de roca puede satisfacer la mayoría de las necesidades de macro y micronutrientes y reducir los costos de aplicación en más del 60%, con beneficios duraderos para la fertilidad del suelo. Conceição et al. (2022) observaron que el maíz y el frijol cultivados en suelos enriquecidos con basalto produjeron rendimientos hasta cinco veces mayores que los cultivados en suelos sin tratar. A pesar de estos beneficios, es ampliamente reconocido que el polvo de roca libera nutrientes más lentamente que los fertilizantes químicos, una característica que, según Theodoro y Leonardos (2006), ofrece la ventaja de una disponibilidad prolongada de nutrientes en el suelo. Bauwhede et al. (2024) respaldan este punto de vista, afirmando que la liberación lenta de nutrientes del polvo de roca reduce la lixiviación,

aunque su efectividad depende de la mineralogía de la roca, el pH del suelo y las metodologías de prueba. Grecco et al. (2016) también señalan que el bajo costo de procesamiento y la demanda de fertilizantes alternativos incentivan el uso de rocas molidas en la agricultura. Sin embargo, advierten que la variabilidad en las reacciones de meteorización entre los tipos de roca dificulta predecir las tasas de liberación de nutrientes y que se necesita más investigación en esta área. Dos Santos et al. (2016) explican que la liberación de nutrientes del polvo de roca ocurre a un ritmo significativamente más lento en comparación con los fertilizantes químicos. Si bien esta liberación gradual puede ofrecer beneficios a largo plazo para la fertilidad del suelo, también presenta desafíos, como la necesidad de tasas de aplicación más altas y períodos más largos antes de que se observen respuestas agronómicas notables. Lopes-Assad et al. (2006) informaron que el hongo *Aspergillus niger* solubiliza eficazmente las rocas fosfóricas, produciendo ácidos orgánicos. Su estudio observó fluctuaciones de pH durante el tratamiento: en condiciones ácidas, la solubilización de potasio aumentó, mientras que en tratamientos con rocas ultramáficas alcalinas, la acidez reducida se asoció con una menor liberación de potasio. Para abordar eficazmente la acidez del suelo, el encalado con carbonatos de calcio y/o magnesio, como la calcita y la dolomita, se considera el método más eficiente. Según Goulding (2016), estos minerales reaccionan con los iones de hidrógeno en la solución del suelo y los compuestos de aluminio, reduciendo así la toxicidad del aluminio y mejorando el pH del suelo. La idoneidad del polvo de roca como fertilizante también varía según el tipo de cultivo. Por ejemplo, es poco probable que cultivos como la lechuga, que requieren altas concentraciones de nutrientes solubles durante una temporada de crecimiento corta, se beneficien de la aplicación de basalto. Hanish et al. (2024) descubrieron que la aplicación de hasta 100 gramos de polvo de basalto por maceta no mejoró el rendimiento de la lechuga, que se mantuvo casi cuatro veces inferior al de los fertilizantes convencionales. Este resultado refuerza la idea de que el polvo de basalto, debido a su baja concentración de nutrientes y su lenta liberación, no es adecuado para cultivos de ciclo corto y alta demanda. Guimarães et al. (2020) observaron que los huertos de banano fertilizados exclusivamente con fertilizantes minerales produjeron más frutos que los tratados con mezclas organominerales. Sin embargo, esto último resultó en una menor acidificación del suelo y una mayor disponibilidad de fósforo y potasio. El estudio también señaló que los niveles excesivos de potasio pueden provocar desequilibrios nutricionales, lo que afecta negativamente la productividad de las plantas. Por lo tanto, se necesita más investigación para desarrollar estrategias de fertilización optimizadas para el banano que promuevan la productividad y mantengan la salud del suelo.

Finalmente, como destacan Viana, Caetano y Pontes (2021), si bien el polvo de roca muestra un potencial considerable en la agricultura brasileña, especialmente cuando se combina con aditivos orgánicos como el estiércol animal, su eficacia sigue siendo poco estudiada. Se debe tener cuidado de no sobreestimar sus beneficios sin suficiente respaldo empírico. Organicospro (2018)

señala que la caliza, una roca ampliamente reconocida, está compuesta principalmente de carbonato de calcio (en forma de calcita) o carbonato de calcio y magnesio (dolomita). En contraste, el polvo de basalto es rico en minerales de silicato, que aportan silicio, un nutriente vital para la salud y la productividad de las plantas. Estas composiciones contrastantes ilustran los distintos beneficios que ofrece cada material. El polvo de basalto, en particular, desempeña un papel valioso en la restauración de suelos degradados o con deficiencia de nutrientes, aumentando la actividad microbiana y la producción agrícola en general. Las ventajas reportadas de la biomineralización con basalto incluyen: – Restauración de suelos deficientes en nutrientes – Reducción progresiva de la acidez del suelo – Mejora de la aireación y la estructura del suelo – Menor dependencia de fertilizantes químicos – Mejor germinación de semillas – Mejor desarrollo de raíces y brotes – Tallos y corteza fortalecidos – Formación de una película foliar protectora contra plagas y estrés ambiental – Mayor durabilidad poscosecha – Mayor densidad de nutrientes en los cultivos. Batista (2016) investigó los efectos del polvo de basalto aplicado en cantidades variables, con y sin caliza. Los tratamientos con caliza añadida mostraron un mayor contenido de potasio y niveles de pH más altos en comparación con los que no la usaron. Sin embargo, la corrección general del pH fue menos efectiva que en los tratamientos que utilizaron solo caliza. Hammerschmitt et al. (2021) destacaron que la reacidificación del suelo es un proceso gradual y que la reaplicación de cal superficial generalmente es adecuada para la remediación. Su estudio demostró que tanto la aplicación superficial como la incorporación de cal produjeron condiciones químicas del suelo similares. La soja respondió positivamente, aunque de forma moderada, a la reaplicación (incremento promedio del rendimiento de 252 kg ha⁻¹ año⁻¹), mientras que el maíz mostró una respuesta mínima. Los minerales de aluminosilicato presentes en los polvos de roca (PR) incluyen ortosilicatos (p. ej., olivino), inosilicatos (p. ej., piroxenos como el dióxido y anfíboles como la hornblenda), tectosilicatos (p. ej., ortoclase, plagioclase, nefelina y leucita) y filosilicatos (p. ej., micas de biotita y moscovita) (Calabrese et al., 2022; Swoboda et al., 2022; van Straaten, 2006). Aunque los RP pueden servir como alternativa al encalado, suelen tener una menor capacidad de neutralización de ácidos (RAN) y una liberación más lenta de alcalinidad. Sin embargo, aportan nutrientes esenciales como calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K), fósforo (P) y azufre (S) (de Vries et al., 2021; Ramos et al., 2022; Swoboda et al., 2022). En apoyo de esto, Swoboda, Döring y Hamera (2020) observaron que modificaciones específicas de los polvos de roca de silicato (PRS) pueden mejorar significativamente su eficiencia agronómica. Además, una mayor meteorización de los PRS puede contribuir al secuestro de CO₂ atmosférico, mientras que el silicio aportado mediante estas modificaciones puede aumentar la resiliencia de las plantas a los estresores bióticos y abióticos. Se necesita más investigación para comprender el uso de polvos de roca de silicato (SRP) asociados con piedra caliza, fertilizantes químicos o estiércol animal, y en particular la importancia del tipo de roca en relación con el tipo de suelo y el cultivo, además de la cantidad, como se ve claramente en la [Figura 3](#).

Bergmann y Holland (2014) enfatizan que, al evaluar una roca para su uso como remineralizador del suelo, es esencial analizarla mediante petrografía, una técnica que identifica los minerales y evalúa su textura, secuencia de cristalización, tamaño de grano y grado de alteración. Además, cualquier material aplicado al suelo debe cumplir criterios estrictos, en particular respecto a la presencia de sustancias nocivas o potencialmente nocivas. Esto incluye metales pesados tóxicos, compuestos que pueden provocar la salinización del suelo o minerales inertes, como el sodio y el cuarzo, que pueden afectar negativamente la estructura del suelo.

2. Mejores prácticas y lecciones aprendidas de la agricultura biodinámica. Una alternativa eficaz a la agricultura industrial convencional, cada vez más criticada por su excesiva dependencia de la mecanización, los productos químicos sintéticos, los herbicidas y su desprecio por la sostenibilidad ecológica, es la agricultura biodinámica. Este enfoque se basa en principios orgánicos y los amplía a través de un marco holístico, ecológico y ético que abarca la agricultura, la jardinería, la nutrición y las relaciones más amplias entre el ser humano y la naturaleza. Promueve un estilo de vida arraigado en una profunda conciencia del paisaje, el desarrollo personal y la participación comunitaria. Las prácticas biodinámicas, como las describe Paull (2011), enfatizan la búsqueda de la autosuficiencia energética y de insumos (en fertilizantes, semillas y ganado), trabajando en armonía con los ritmos naturales, cultivando la biodiversidad y abordando el trabajo agrícola con diligencia, precisión y observación minuciosa. La puntualidad y la atención a los ciclos estacionales son esenciales para el sistema. La gestión de la fertilidad del suelo es fundamental en la agricultura biodinámica. Según Campbell y Watson (2012) y Raupp (2001), las mejoras se logran mediante una gestión eficaz del humus, que incluye el uso de compost y estiércol bien fermentado, rotaciones de cultivos diversificadas, protección contra la erosión (p. ej., cortavientos), cultivos de cobertura, abonos verdes y policultivos para promover el apoyo interespecífico. Boicean y Dent (2020) enfatizan la importancia de alternar cultivos que agotan el suelo, como el maíz, la papa y las crucíferas, con leguminosas que lo enriquecen, como los frijoles, los guisantes y el trébol. Las rotaciones de cultivos también deben alternar especies de raíces profundas y superficiales, y aquellas que requieren nutrientes externos, con aquellas que crecen con insumos mínimos. En consonancia con estos principios, la FAO (2021) informó que las prácticas agrícolas sostenibles, incluidas las del paradigma biodinámico, pueden mitigar la degradación ambiental, aumentar la resiliencia a los factores de estrés climático y mejorar progresivamente la calidad del suelo y la tierra. Potencial para el uso de polvo de roca en Roraima. Un estudio perspicaz de Bergmann y Holland (2014), en el marco del programa brasileño "Geodiversidad del Estado de Roraima", evaluó el potencial de remineralización del suelo utilizando polvo de roca en la región. El trabajo delimitó seis zonas geográficas basadas en la diversidad del suelo, la topografía, el clima y las limitaciones del uso del suelo. La zona más prometedora para la aplicación de polvo de roca comprende áreas dominadas por rocas máficas y ultramáficas (diabasa, basalto y gabro), donde predominan suelos como argisoles rojos, oxisoles

rojos, vertisoles, chernosoles y nitisoles. En Roraima, la mayoría de los suelos son naturalmente ácidos y de baja fertilidad, lo que representa importantes barreras para la agricultura convencional. Si bien existen suelos eutróficos más fértiles, están menos extendidos geográficamente y a menudo se utilizan con un aporte tecnológico limitado, dependiendo en gran medida de prácticas empíricas en comunidades rurales y asentamientos. Otras limitaciones a la productividad agrícola incluyen la infraestructura deficiente, una red vial subdesarrollada, la falta de mano de obra calificada, la inversión pública insuficiente y un régimen fiscal oneroso.

A pesar de estos desafíos, la región se beneficia de un clima ecuatorial altamente propicio para la agricultura, a menudo superando a otras regiones de Brasil. Promover prácticas agrícolas sostenibles, como la remineralización del suelo mediante polvo de roca, representa una oportunidad estratégica para aumentar la productividad, fomentar la gestión ambiental, apoyar los medios de vida indígenas e impulsar el desarrollo económico inclusivo. La agricultura biodinámica ofrece una alternativa atractiva a la agricultura industrial, que se está volviendo cada vez más insostenible debido al uso excesivo de maquinaria, productos químicos, herbicidas y la desatención al impacto ambiental. Más allá de la agricultura orgánica, la agricultura biodinámica adopta un enfoque holístico y ético para la producción de alimentos. Enfatiza la interconexión entre las personas, la tierra y la naturaleza, centrándose en el equilibrio ecológico, la conciencia personal y la participación comunitaria. Enfatiza la interconexión entre las personas, la tierra y la naturaleza, centrándose en el equilibrio ecológico, la conciencia individual y la participación comunitaria, y fomentando el desarrollo económico inclusivo. La agricultura biodinámica ofrece una alternativa atractiva a la agricultura industrial, que se está volviendo cada vez más insostenible debido al uso excesivo de maquinaria, productos químicos, herbicidas y la desatención a los impactos ambientales. Más allá de la agricultura orgánica, la agricultura biodinámica adopta un enfoque holístico y ético para la producción de alimentos. Enfatiza la interconexión entre las personas, la tierra y la naturaleza, centrándose en el equilibrio ecológico, la conciencia individual y la participación comunitaria.

Como lo describe Paull (2011), las prácticas biodinámicas comunes incluyen lograr la autosuficiencia energética, de fertilizantes y ganadera; alinear el trabajo con los ritmos naturales; utilizar diversos sistemas vegetales y animales; y mantener la precisión, la observación y la puntualidad en las tareas agrícolas. Según Campbell y Watson (2012) y Raupp (2001), un suelo sano en sistemas biodinámicos se mantiene mediante materiales orgánicos compostados, rotación de cultivos, protección del suelo (p. ej., cortavientos) y el uso de cultivos mixtos en lugar de monocultivos. Boicean y Dent (2020) también recomiendan alternar cultivos que agotan los nutrientes (p. ej., maíz, papas, repollo) con cultivos enriquecedores (p. ej., legumbres) y equilibrar los cultivos de raíces superficiales y profundas para mantener la fertilidad del suelo. La FAO (2021) confirma que las prácticas agrícolas sostenibles como la biodinámica pueden proteger los ecosistemas, mejorar la resiliencia alimentaria al cambio climático y

mejorar la salud del suelo con el tiempo. En Roraima, el potencial de aplicar polvo de roca como enmienda del suelo fue analizado en un importante estudio realizado por Bergmann y Holland (2014) como parte de la iniciativa más amplia "Geodiversidad del Estado de Roraima".

El estudio identificó seis zonas terrestres distintas, siendo las más adecuadas para el uso de polvo de roca las áreas con rocas básicas como basalto, gabro y diabasa. Estas regiones presentan oxisoles rojos, argisoles y otros suelos tropicales meteorizados. Los suelos de Roraima son predominantemente ácidos y pobres en nutrientes, lo que limita la productividad agrícola. Existen suelos eutróficos con mejor fertilidad, pero están menos extendidos y a menudo se manejan con métodos de baja tecnología en áreas rurales aisladas. Esto se ve agravado por desafíos como infraestructura deficiente, mano de obra calificada limitada y falta de inversión gubernamental. Sin embargo, el clima ecuatorial favorable de Roraima le da a la región una ventaja competitiva en términos de rendimiento agrícola en comparación con otras partes de Brasil. La aplicación de métodos sostenibles, como la remineralización de polvo de roca, puede abordar muchos desafíos: aumentar la productividad, mejorar la salud del suelo, apoyar la agricultura indígena y promover la sostenibilidad regional. En Roraima, la agricultura se practica principalmente en la región de La Sabana. Según Júnior y Schaefer (2010), los suelos dominantes aquí incluyen varios tipos de canosoles (amarillo, rojo-amarillo y rojo), argisoles (rojo y amarillo-rojo) y neosoles (hidromórficos, orgánicos, flúvicos y líticos). Estos suelos suelen tener baja fertilidad, con alta acidez, baja saturación de bases y mala retención de nutrientes. El fósforo intercambiable es especialmente bajo, por lo que el ajuste regular del pH es necesario para una agricultura exitosa. Los suelos agrícolas más fértiles del estado se encuentran en áreas con formaciones rocosas básicas:

- El umbral de Pedra Preta en la región de Uiramutã;
- Rocas volcánicas de Apoteri cerca de Serra de Nova Olinda; y
- El área de Taiano, conocida por sus suelos fértiles derivados del basalto.

Los sitios clave incluyen:

- Vila do Taiano (noroeste de Roraima),
- Serra de Nova Olinda (centro de Roraima), y
- Cerca de Flechal, una aldea indígena en Uiramutã.

En estas zonas, los suelos formados a partir de basalto meteorizado y otras rocas básicas, como oxisoles, chernosoles y suelos orgánicos, son ricos en nutrientes. En Pedra Preta Silo, rocas como la diabasa, la diorita y el gabro contribuyen a la fertilidad de los suelos, como los nitisoles, presentes en las zonas de bosque de montaña. Una muestra de roca diabasa de la región de Taiano (municipio de Alto Alegre), que se muestra en la Figura 1, mostró una fuerte reacción positiva en el ensayo de fosfomolibdato, lo que confirma su potencial como enmienda para suelos ricos en fósforo.

Además de Alto Alegre, se ha reportado la presencia de tierras raras, niobio, bario y fosfato en el municipio de Iracema. En la agricultura familiar brasileña, los agricultores suelen combinar polvo de roca con residuos orgánicos, como estiércol animal y fertilizantes verdes, para mejorar la salud del suelo. Estos insumos suelen generarse en la finca mediante compostaje, utilizando microorganismos que facilitan la liberación de nutrientes. El nitrógeno se suele aportar mediante la plantación

de especies de abono verde, especialmente *Tithonia diversifolia* (girasol mexicano), que puede aportar hasta un 4,3 % de potasio a través de sus hojas y tallos (Palm et al., 1997 apud van Straaten, 2007). Para obtener mejores resultados, es importante comprender que el polvo de roca interactúa con todo el sistema del suelo, incluyendo los microorganismos del suelo y las formas específicas en que las raíces de las plantas absorben los nutrientes (Mundstock, 2013). Los estudios demuestran que el polvo de roca se puede utilizar en la mayoría de los cultivos y aplicarse en tamaños de partículas entre 0,105 mm y 4,0 mm (similar a la aplicación de cal) a mano o con máquina. Las tasas recomendadas varían de 0,5 a 8 toneladas por hectárea, dependiendo del suelo y el cultivo. En Brasil, los basaltos y diabasas de la región de Serra Geral son prometedores para el uso agrícola. Estas rocas son ricas en calcio, magnesio y hierro y a menudo están disponibles en forma de polvo en canteras. Debido a que sus minerales se descomponen más fácilmente, pueden liberar nutrientes con relativa rapidez cuando se muelen al tamaño adecuado. Las rocas volcánicas alcalinas, con su alto contenido de potasio y sus finas estructuras cristalinas, también son

excelentes para la remineralización del suelo. Hasta la fecha, solo una roca, la fonolita de Poços de Caldas, ha sido aprobada oficialmente en Brasil como sustituto local del fertilizante de cloruro de potasio (KCl) importado (Cortes et al., 2009). Sin embargo, es esencial analizar estas rocas para determinar los niveles de micronutrientes y cualquier elemento potencialmente dañino (Bergmann y Holland, 2014).

Dependencia de Brasil de fertilizantes

Los polvos de roca aportan una mayor variedad de nutrientes que la mayoría de los fertilizantes químicos. Además de los nutrientes principales (P, K, Ca, S, Mg), pueden aportar micronutrientes importantes como Zn, Cu, Fe, Mn, Mo, B, Co y Ni, dependiendo del tipo de roca. En contraste, los fertilizantes estándar suelen ofrecer solo N, P y K, y solo algunos productos más nuevos incluyen Ca, Mg o micronutrientes como B y Zn. Sin embargo, estos fertilizantes altamente solubles suelen perder nutrientes rápidamente en el clima cálido y lluvioso de Brasil. Por esta razón, el polvo de roca y la remineralización del suelo están cobrando importancia como formas sostenibles de



Figura 3. Muestras de diabasa de Taiano (municipio de Alto Alegre) con un resultado positivo fuerte en la prueba de fosfomolibdato.

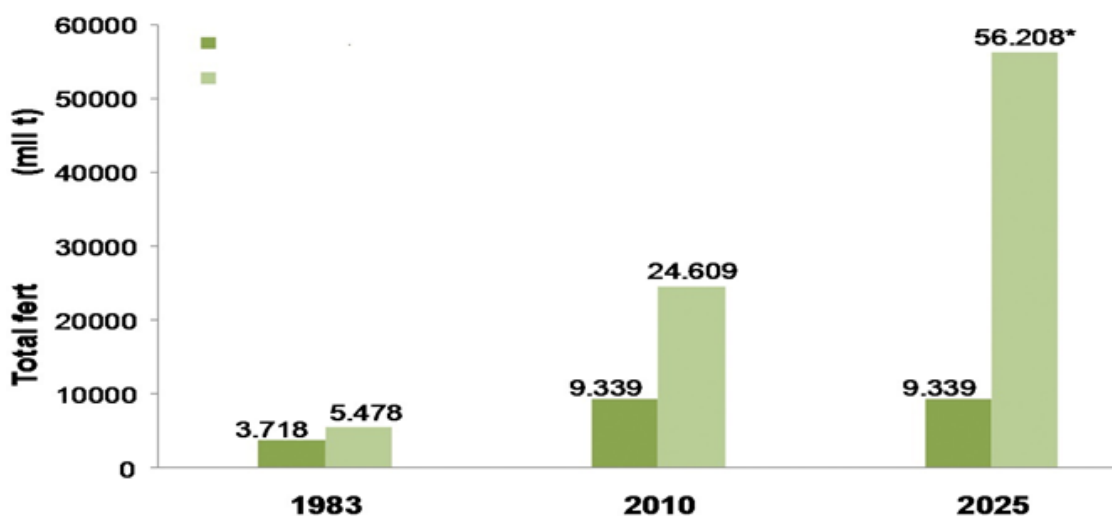


Figura 4. Gráfico de la producción y demanda de fertilizantes en Brasil. Adaptado de Martins (2013). Fuente: ANDA (2011). Proyecto Mbagro.

restaurar la fertilidad del suelo. Esto es especialmente urgente en Brasil, que importa alrededor del 65% de los materiales utilizados para la fabricación de fertilizantes. Para 2025, esta cifra podría ascender al 83%, lo que representa una seria preocupación para la seguridad alimentaria y la sostenibilidad agrícola (Bergmann & Holland, 2014; Figura 4).

Goulart et al. (2023) informan que la región de Novos Campos en Roraima contiene depósitos de fosfato magmatogénico vinculados a la asociación rocosa anortosita-manager-chanockita-shanita (AMCG). Minerales de fosfato magmático-hidrotermal y tierras raras también están presentes en complejos volcánicos alcalinos. Las unidades de gabroanortosita del grupo AMCG Mucajá presentan el mayor potencial de fosfato de la zona. La fuerte dependencia de Brasil de los fertilizantes importados lo hace vulnerable a las fluctuaciones del mercado internacional, como las fluctuaciones del tipo de cambio, las políticas comerciales y los retrasos en los envíos. Estos factores pueden interrumpir el suministro constante de fertilizantes esenciales para la agricultura, poniendo en peligro la producción agrícola y la seguridad alimentaria. La importación de fertilizantes requiere transporte de larga distancia e infraestructura robusta para su almacenamiento y distribución, lo que incrementa los costos y, en última instancia, los precios

para los agricultores. Los impuestos a la importación de fertilizantes, como el IVA, aumentan estos costos y provocan un aumento de los precios de los alimentos para los consumidores. Para abordar esto, el gobierno brasileño lanzó el Plan Nacional de Fertilizantes (PNF) en noviembre de 2022. Este plan busca reducir la dependencia de las importaciones de fertilizantes y guiar al sector hasta 2050. A pesar de esto, muchos agricultores aún dudan en adoptar métodos de fertilización biodinámica o de cultivo local. Los pequeños agricultores a menudo carecen de educación sobre estas prácticas, mientras que las explotaciones medianas y grandes continúan dependiendo de fertilizantes químicos importados. También existe una brecha en la legislación y el apoyo gubernamental para facilitar el acceso de los agricultores a fertilizantes alternativos, como el polvo de roca, y para desarrollar infraestructura, como trituradoras de roca. Se necesita más apoyo para los estudios de suelos y el intercambio de investigación científica de agencias como Embrapa y el Servicio Geológico de Brasil. La Ley brasileña n.º 12.890 (2013) regula la producción y comercialización de fertilizantes, enmiendas de suelo, inóculos, biofertilizantes y remineralizantes. La Instrucción Normativa n.º 39 (2018) establece reglas detalladas para el registro, etiquetado y publicidad de fertilizantes minerales. Recientemente, el Ministerio de Agricultura (MAPA) estandarizó las normas

Tabla 1. Hipótesis del modelo Cultura-Conocimiento-Inteligencia (CCI).

Hipoteses	Fuentes	Resultado
La cultura tiene un impacto positivo en el conocimiento.	Leidner et al. (2006), Deal y Kennedy (1982), y Tweed y Lehman (2002) sugieren que la forma en que las personas perciben, organizan y procesan la información, se comunican con los demás, comprenden, organizan, generan conocimiento y resuelven problemas está relacionada con la cultura.	APOYADO
La cultura tiene un impacto positivo en la inteligencia.	La cultura, más que la genética, determina el comportamiento y las acciones (KROEBER, 1949). Umuteme et al. (2023) argumentan que factores como los valores, las normas, las creencias y las prácticas arraigadas en la cultura organizacional configuran significativamente el entorno general del proyecto y afectan la dinámica del equipo.	APOYADO
El conocimiento tiene un impacto positivo en la inteligencia.	Rothberg y Erickson (2004) argumentan que el conocimiento es estático y, en última instancia, solo tiene valor si las personas lo utilizan (inteligencia).	APOYADO

para la producción y comercialización de remineralizantes (polvo de roca), que mejoran la calidad del suelo de forma diferente a los fertilizantes convencionales, principalmente debido a su menor solubilidad. Con estas nuevas normas, los agricultores pueden verificar la calidad del producto mediante un registro oficial. Las normas publicadas en junio de 2023 (Instrucciones 5 y 6) exigen a los fabricantes el cumplimiento de estándares estrictos, garantizando productos consistentes y seguros. Esta normativa abre nuevas opciones para los agricultores, especialmente para los productores orgánicos que evitan los fertilizantes minerales pero aceptan el polvo de roca. Responde a una demanda histórica y se reconoce en el Boletín Oficial como una valiosa alternativa para restaurar la fertilidad del suelo.

Modelo Cultura-Conocimiento-Inteligencia

Según Kroeber (1949), los humanos se diferencian de los animales principalmente por su cultura. Esta les permite trascender sus límites biológicos, acumulando experiencias a lo largo del tiempo y creando un legado compartido. 1. La cultura, más que la genética, guía el comportamiento e influye en las acciones humanas. 2. Los humanos se desarrollan y envejecen según las normas culturales, ya que muchos instintos se han debilitado debido a los largos cambios evolutivos. 3. La cultura es un proceso acumulativo formado por las experiencias históricas de generaciones pasadas, que puede limitar o fomentar la creatividad individual. Con base en estas ideas, se creó el modelo Cultura-Conocimiento-Inteligencia (CCI) (Tabla1, Figura 5). Sus puntos principales incluyen: (i) La cultura consiste en las creencias, valores, suposiciones y tradiciones de una sociedad (Schein, 2010). (ii) Para que la educación sea eficaz, los currículos deben reestructurarse en torno a cuatro pilares del aprendizaje: saber, hacer, vivir juntos y ser (Smith, 2018). (iii) La inteligencia depende de tres pilares: previsión, estrategia y acción (Rothberg & Erickson, 2004).

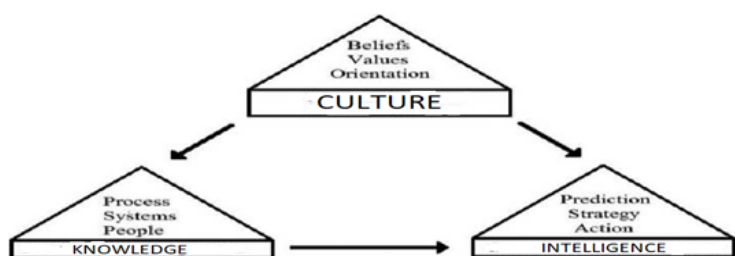


Figura 5. Modelo Cultura-Conocimiento-inteligencia (adaptado de Choo, 1998).

Modelo de agricultura Biodinámica

Gracias a su capacidad para crear y compartir conocimiento colectivo, las cooperativas han contribuido significativamente al desarrollo local y nacional. Silva et al. (2006) descubrieron que 60 cooperativas agrícolas aumentaron sus ganancias en un 130 %. Existen cooperativas en diversos sectores, como la agricultura, la salud, el crédito, el transporte y la educación. De estos, la agricultura es el sector más desarrollado y reconocido a

nivel nacional e internacional. Las cooperativas rurales desempeñan un papel fundamental en la construcción de capital social, uniendo a los socios de la cooperativa y a la comunidad circundante en esfuerzos comunes. La Figura 6 presenta el modelo de agricultura familiar biodinámica.



Figura 4. Modelo de agricultura familiar biodinámica. Fuente: Autor, 2024. El modelo de agricultura biodinámica demuestra que las cooperativas agrícolas son fundamentales para este sistema agrícola.

Conclusiones

Para que los agricultores se reúnan y resuelvan sus problemas, es esencial una cultura que acoja la capacitación, especialmente en fertilizantes, como se mencionó anteriormente. La capacitación centrada en la aplicación de polvo de roca es fundamental para el desarrollo y la sostenibilidad de la agricultura biodinámica. Además, este modelo demuestra que los cambios culturales entre los pequeños agricultores familiares inciden positivamente en la gestión del conocimiento dentro de las cooperativas y ayudan a desarrollar e implementar el Plan de Asistencia Técnica y Financiera para Agricultores, que representa el componente de inteligencia. Conclusiones: La agricultura biodinámica se basa en una cultura madura que anima a los agricultores a crear soluciones basadas en la explotación agrícola utilizando recursos naturales. Este artículo revisó la literatura sobre polvo de roca y la fijación biológica de nitrógeno y propuso dos modelos conectados: el modelo Cultura-Conocimiento-Inteligencia y el modelo de Agricultura Biodinámica basado en el intercambio cooperativo de conocimiento. El estudio concluyó que se necesita más investigación para abordar los desafíos asociados con la disolución de polvos de roca de silicato en los cultivos, incluyendo la calidad y cantidad del material, y la posibilidad de mezclarlo con piedra caliza, estiércol o fertilizantes químicos. Este trabajo se lleva a cabo en un entorno de cooperación y colaboración entre agricultores e investigadores, lo que resalta la importancia de comprender el rol de la cultura en la gestión del conocimiento y la inteligencia para construir una cultura sólida que aplique conocimientos útiles.

Referencias

- Abreu, K. (2016). Mapa regulamenta produção, registro e comércio do pó de rocha na agricultura. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/mapa-regulamenta-producao-registro-e-comercio-do-po-de-rocha-na-agricultura>
- Anda, M., Shamshuddin, J., & Fauziah, C. I. (2015). Improving chemical properties of a highly weathered soil using finely ground basalt rocks.
- Catena, 124, 147–161. Assad, M.-L., Rosa-Magri, M., Erler, G., & Antonini, S. (2006). Solubilização de pó-de-rocha por *Aspergillus niger*.

- Arnott, N., Galagedara, L., Thomas, R., Cheema, M., & Sobze, J.-M. (2022). The potential of rock dust nanoparticles to improve seed germination and seedling vigor of native species: A review. *Science of the Total Environment*, 775, Article 145904. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145904>
- Assad, M.-L., Rosa-Magri, M., Erler, G., & Antonini, S. (2006). Solubilização de pó-de-rocha por *Aspergillus niger*.
- Bamberg, A., Martinazzo, R., Silveira, C., Pillon, C., Stumpf, L., Bergmann, M., van Straaten, P., & Martins, E. (2023). Selected rock powders as sources of nutrients for soil fertilization and maize-wheat grain production in southern Brazil. *The Journal of Agricultural Science*, 161, 1–43. <https://doi.org/10.1017/S002185962300062X>
- Batista, N. T. F., et al. (2016). Atributos químicos de um latossolo vermelho amarelo sob cultivo de soja e sorgo submetido ao uso de basalto moído. En *Anais do III Congresso Brasileiro de Rochagem* (pp. 240–247). Embrapa Clima Temperado; Embrapa Cerrados.
- Bauwhede, R. D., Muys, B., Vancampenhout, K., & Smolders, E. (2024). Accelerated weathering of silicate rock dusts predicts the slow-release liming in soils depending on rock mineralogy, soil acidity, and test methodology. *Geoderma*, 441, Article 116748. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116748>
- Bellemare, M. F. (2015). Rising food prices, food price volatility, and social unrest. *American Journal of Agricultural Economics*, 97(1), 1–21. <http://www.jstor.org/stable/24476998>
- Boincean, B., & Dent, D. (2020). Soil fertility – the only possible foundation for more sustainable agriculture. *BIO Web of Conferences*, 17, Article 00119. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20201700119>
- Boincean, B., & Dent, D. (2020). Soil fertility – the only possible foundation for more sustainable agriculture. *BIO Web of Conferences*, 17, Article 00119. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20201700119>
- Brasil. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. (2016, março 14). Instrução Normativa nº 5, de 10 de março de 2016. *Diário Oficial da União*.
- Calabrese, S., Wild, B., Bertagni, M. B., Bourg, I. C., White, C., Aburto, F., Cipolla, G., Noto, L. V., & Porporato, A. (2022). Nano-to global-scale uncertainties in terrestrial enhanced weathering. *Environmental Science & Technology*, 56(22), 15261–15272. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c05312>
- Camargo, C. K., Resende, J. T. V. de, Camargo, L. K. P., Figueiredo, A. S. T., & Zanin, D. S. (2012). Produtividade do morangueiro em função da adubação orgânica e com pó de basalto no plantio. *Semina: Ciências Agrárias*, 33(1), 2985–2993.
- Campbell, W. B., & Ortíz, S. L. (2012). Integrating agriculture, conservation and ecotourism: Societal influences. En *Issues in agroecology – Present status and future prospectus* (Vol. 2).
- Choo, C. W. (1998). *The knowing organisation*. Oxford University Press.
- Conceição, L., Silva, G., Holsback, H., Oliveira, C., Marcante, N., Martins, E., Santos, F., & Santos, E. (2022). Potential of basalt dust to improve soil fertility and crop nutrition. *Journal of Agriculture and Food Research*, 10, Article 100443. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100443>
- Curtis, J., Luchese, A. V., & Missio, R. F. (2022). Application of soil remineralizer to poultry litter as an efficient and sustainable alternative for fertilizing maize crop. *Journal of Plant Nutrition*, 46, 423–438.
- Da Silva, V. A., Da Silva, L. E. S. F., Da Silva, A. J. N., et al. (2017). Solubility curve of rock powder inoculated with microorganisms in the production of biofertilizers. *Agriculture and Natural Resources*, 51, 142–147.
- Dehkordi, M. M., Nodeh, Z. P., & Dehkordi, K. S. (2024). Soil, air, and water pollution from mining and industrial activities: Sources of pollution, environmental impacts, and prevention and control methods. *Results in Engineering*, 23, Article 102456. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102456>
- De Vries, W., de Jong, A., Kros, J., & Spijker, J. (2021). The use of soil nutrient balances in deriving forest biomass harvesting guidelines specific to region, tree species and soil type in the Netherlands. *Forest Ecology and Management*, 479, Article 118591. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118591>
- compartilhamento de notícias falsas via Whatsapp e redes sociais. *Veja*. <https://veja.abril.com.br/brasil/fake-news-uma-ameaca-reconhecida-por-83-dos-brasileiros/>
- Ingole, S. (2015). A review on role of physico-chemical properties in soil quality. *Chemical Science Review and Letters*, 4, 57–66.
- Jacobsen, B. H., Latacz-Lohmann, U., Luesink, H., Michels, R., & Ståhl, L. (2019). Costs of regulating ammonia emissions from livestock farms near Natura 2000 areas: Analyses of case farms from Germany, Netherlands and Denmark. *Journal of Environmental Management*, 246, 897–908. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.047>
- Kahnt, G., Pfliegerer, H., & Hijazi, L. A. (1986). Effect of amelioration doses of rock powder and rock sand on growth of agricultural plants and on physical characteristics of sandy and clay soil. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 157(3), 169–180.
- Khan, S., Zahoor, M., Sher Khan, R., & Ikram, M. (2023). The impact of silver nanoparticles on the growth of plants: The agriculture applications. *Heliyon*, 9(6), Article e16928. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16928>
- Kroeber, A. L. (1949). The concept of culture in science. *The Journal of General Education*, 3(3), 182–196.
- Leidner, D. E., Alavi, M., & Kayworth, T. R. (2006). The role of culture in knowledge management: A case study of two global firms. *International Journal of e-Collaboration*, 2(1), 17–40.
- Lindström, K., & Mousavi, S. A. (2020). Effectiveness of nitrogen fixation in rhizobia. *Microbial Biotechnology*, 13(5), 1314–1335. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13517>
- Luchese, A. V., Pivetta, L. A., Batista, M. A., Steiner, F., Giarretta, A. P. S., & Curtis, J. C. D. (2021). Agronomic feasibility of using basalt powder as soil nutrient remineralizer. *African Journal of Agricultural Research*, 17, 487–497. <https://doi.org/10.5897/AJAR2020.15234>
- Manning, D. A. C., & Theodoro, S. H. (2020). Enabling food security through use of local rocks and minerals. *The Extractive Industries and Society*, 7(2), 480–487.
- Meriño-Gergichevich, C., Alberdi, M., Ivanov, A. G., & Reyes-Díaz, M. (2010). Al^{3+} - Ca^{2+} interaction in plants growing in acid soils: Al-phytotoxicity response to calcareous amendments. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 10(3), 217–243.
- Moreira, F. M. S., & Siqueira, J. O. (2006). *Microbiologia e bioquímica do solo* (2ª ed.). Universidade Federal de Lavras.
- Organicospro. (2018). Pó de rocha na agricultura orgânica. <https://www.organicospro.com.br/po-de-rocha-na-agricultura-organica>
- Paull, J. (2011). Attending the first organic agriculture course: Rudolf Steiner's agriculture course at Koberwitz. *European Journal of Social Sciences*, 21.
- Penha, M. da N. C., Bernardi, A. C. de C., Souza, G. B. de, & Nogueira, A. R. de A. (2016). Caracterização analítica e avaliação agrônômica de rochas silicatadas como fontes de potássio. *Embrapa Pecuária Sudeste*. <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1065222/caracterizacao-analitica-e-avaliacao-agronomica-de-rochas-silicatadas-como-fontes-de-potassio>
- Ramos, C. G., Hower, J. C., Blanco, E., Oliveira, M. L. S., & Theodoro, S. H. (2022). Possibilities of using silicate rock powder: An overview. *Geoscience Frontiers*, 13(1), Article 101359.
- Raupp, J. (2001). Manure fertilization for soil organic matter maintenance and its effects upon crops and the environment, evaluated in a long-term trial. En *Proceedings of the Conference on Organic Farming*.
- Schein, E. H. (2010). *Organizational culture and leadership*. Jossey-Bass.
- Schuler, S., & Conrad, R. (1991). Hydrogen oxidation activities in soil as influenced by pH, temperature, moisture, and season. *Biology and Fertility of Soils*, 12, 127–130.
- Senado Federal. (2018, mayo 24). Fake news podem influenciar eleição. <https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2018/05/24/fake-news-podem-influenciar-eleicao-alerta-professor>
- Silva, D. R. S., Marchi, G., Spehar, C. R., Guilherme, L. R. G., Rein, T. A., Soares, D. A., & Ávila, F. W. (2012). Characterization and nutrient release

from silicate rocks and influence on chemical changes in soil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 36, 951–962.

Silva, M. J., Chaves, L. H. G., Fernandes, J. D., & Chaves, I. D. B. (2015). Using MB-4 rock powder, poultry litter biochar, silicate and calcium carbonate to amend different soil types. *Australian Journal of Crop Science*, 9(10), 987–995.

Silva, C. L., Lourenço, M. S., & Pedro Filho, P. S. (2006). Capital social e cooperativismo no processo de desenvolvimento sustentável: Estudo da cooperativa Bom Jesus - Lapa/PR.

Silva, J. V., Pede, V. O., Radanielson, A. M., Kodama, W., Duarte, A., de Guia, A. H., Malabayabas, A. J., Pustika, A. B., Argosubekti, N., Vithoonjit, D., & Hieu, P. T. (2022). Revisiting yield gaps and the scope for sustainable intensification for irrigated lowland rice in Southeast Asia. *Agricultural Systems*, 198, 103383. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103383>

Smith, P. (2018). Learning to know, be, do, and live together with in the cross-cultural experiences of immigrant teacher educators. *Teaching and Teacher Education*, 69, 263–274.

Swoboda, P., Döring, T. F., & Hamer, M. (2022). Remineralizing soils? The agricultural usage of silicate rock powders: A review. *Science of the Total Environment*, 807, Article 150976. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150976>

Taylor, L. L., Driscoll, C. T., Groffman, P. M., Rau, G. H., Blum, J. D., & Beerling, D. J. (2021). Increased carbon capture by a silicate-treated forested watershed affected by acid deposition. *Biogeosciences*, 18, 169–188.

Teixeira, P. C., Dias, R. C., Veneu, D. M., Monte, M. B. M., Loyola, J. A. D., & Zonta, E. Eficiência relativa de rochas silicáticas cominuidas no fornecimento de potássio para plantas de milho. Embrapa Solos. <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1160268/eficiencia-relativa-de-rochas-silicaticas-cominuidas-no-fornecimento-de-potassio-para-plantas-de-milho>

Theodoro, S. H., & Leonardos, O. H. (2006). The use of rocks to improve family agriculture in Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 78(4), 721–730. <https://doi.org/10.1590/S0001-37652006000400008>

Tweed, R. G., & Lehman, D. R. (2002). Learning considered within a cultural context: Confucian and Socratic approaches. *American Psychologist*, 57(2), 89–99. <https://doi.org/10.1037/0003-066X.57.2.89>

Umuteme, O., & Adegbite, W. (2023). Mitigating the impact of cross-culture on project team effectiveness in the Nigerian oil and gas industry: The mediating role of organizational culture and project leadership. *Social Sciences & Humanities Open*.

Van Diggelen, R., Bergsma, H., Bobbink, R., Sevink, J., Siebel, H., Siepel, H., Vogels, J., & de Vries, W. (2019). Steenmeel en natuurherstel: Een gelukkige relatie of een risicovolle combinatie?.

Van Straaten, P. (2006). Farming with rocks and minerals: Challenges and opportunities. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 78(4), 731–747.

Van Straaten, P. (2017). Rocks for crops in the world. En *Anais do*

III Congresso Brasileiro de Rochagem (pp. 59–70). Embrapa Clima Temperado.

Vieira, R. F. (2017). Ciclo do nitrogênio em sistemas agrícolas. Embrapa.

Vicca, S., Goll, D. S., Hagens, M., Hartmann, J., Janssens, I. A., Neubeck, A., Peñuelas, J., Poblador, S., Rijnders, J., Sardans, J., Struyf, E. (2022). Is the climate change mitigation effect of enhanced silicate weathering governed by biological processes? *Global Change Biology*, 28(3), 711–726. <https://doi.org/10.1111/gcb.15942>

Writzl, T. C., Canepelle, E., Stein, J. E. S., Kerkhoff, J. T., Steffler, A. D., Silva, D. W., & Redi, M. (2019). Produção de milho pipoca com uso do pó de rocha de basalto associado à cama de frango em latossolo. *Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável*, 9(2)