XXXI

Optimización de la huella hídrica y salinidad del suelo mediante sistemas de riego deficitario controlado en el cultivo de Vaccinium corymbosum (arándano) en el valle de Chavimochic, La Libertad

Jose Victor Quiroz Ramirez

XXXI

Optimización de la huella hídrica y salinidad del suelo mediante sistemas de riego deficitario controlado en el cultivo de Vaccinium corymbosum (arándano) en el valle de Chavimochic, La Libertad

Jose Victor Quiroz Ramirez

RESUMEN

El presente capítulo de revisión narrativa analiza la optimización de la huella hídrica y la mitigación de la salinidad del suelo mediante la implementación de sistemas de riego deficitario controlado (RDC) en el cultivo de arándano (Vaccinium corymbosum) dentro del valle de Chavimochic, La Libertad. Ante un contexto climático adverso caracterizado por una alta demanda evaporativa y escasez hídrica en la costa peruana, la agricultura intensiva enfrenta el desafío crítico de conciliar su alta rentabilidad exportadora con la sostenibilidad de los recursos naturales. Mediante una síntesis de la literatura científica y técnica reciente, se examina cómo las reducciones programadas del volumen de riego logran disminuir significativamente la huella hídrica azul y optimizar la eficiencia en el uso del agua, respetando las etapas fenológicas más sensibles del arbusto para evitar mermas en el rendimiento. No obstante, la investigación advierte que estas estrategias exigen un monitoreo riguroso de la conductividad eléctrica del suelo para prevenir procesos de salinización en la rizósfera derivados de una menor fracción de lavado. Finalmente, se discuten las brechas tecnológicas a nivel de predio y la necesidad de promover investigaciones a largo plazo para consolidar el RDC como un pilar de resiliencia climática y gestión ambiental en la agroindustria moderna.

Palabras clave: Arándano, Riego deficitario controlado, Huella hídrica, Salinidad del suelo, Valle de Chavimochic.

ABSTRACT

This narrative review chapter analyzes the optimization of water footprint and the mitigation of soil salinity through the implementation of regulated deficit irrigation (RDI) systems in blueberry (*Vaccinium corymbosum*) cultivation in the Chavimochic Valley, La Libertad. Amidst an adverse climate context characterized by high evaporative demand and water scarcity along the Peruvian coast, intensive agriculture faces the critical challenge of reconciling high export profitability with natural resource sustainability. Through a synthesis of recent scientific and technical literature, the study examines how scheduled reductions in irrigation volume can significantly lower the blue water footprint and optimize water use efficiency, while respecting the shrub's most sensitive phenological stages to avoid yield losses. However, the research cautions that these strategies require rigorous monitoring of soil electrical conductivity to prevent salinization processes in the rhizosphere resulting from a reduced leaching fraction. Finally, the chapter discusses farm-level technological gaps and the need to promote long-term research to establish RDI as a cornerstone of climate resilience and environmental management in modern agribusiness.

Keywords: Blueberry, Regulated deficit irrigation, Water footprint, Soil salinity, Chavimochic Valley.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el cultivo de arándanos (Vaccinium corymbosum) ha experimentado una expansión sin precedentes en el Perú, posicionando al país como uno de los principales exportadores globales de este fruto en el mercado internacional. Este auge productivo tiene un epicentro estratégico en la costa norte, particularmente en el ámbito geográfico del Proyecto Especial Chavimochic, situado en la región La Libertad. No obstante, el vertiginoso crecimiento de esta agroindustria intensiva enfrenta grandes desafíos de sostenibilidad vinculados a la alta demanda de recursos naturales y a la vulnerabilidad climática regional.

La agricultura desarrollada en la costa peruana se caracteriza por su emplazamiento en un entorno árido, condicionado por una marcada escasez de precipitaciones, una elevada demanda evaporativa atmosférica y una marcada dependencia de los

aportes hídricos superficiales procedentes de la cordillera. Aunado a esto, las prácticas continuas de riego y la aplicación intensiva de fertilizantes químicos han propiciado problemas crecientes de degradación edáfica, destacando la acumulación de sales solubles en la rizósfera. Como señalan diversos autores, Vaccinium corymbosum es una especie botánica altamente sensible tanto al déficit hídrico desregulado como al estrés salino, lo cual compromete de manera directa su desarrollo vegetativo, el volumen de biomasa y el rendimiento comercial de la fruta.

Para contrarrestar estas limitaciones ambientales y productivas, surge la necesidad de adoptar tecnologías avanzadas de gestión agrícola, destacando el uso del riego deficitario controlado (RDC). El RDC se define como una técnica de agricultura de precisión que somete al cultivo a un déficit hídrico predeterminado y controlado de manera estricta durante las etapas fenológicas de menor sensibilidad al estrés, logrando optimizar de forma significativa el consumo del recurso hídrico sin incurrir en mermas drásticas de la productividad. Esta práctica agronómica busca minimizar las pérdidas por percolación profunda y reducir sustancialmente los indicadores de la huella hídrica asociada a la cadena agroexportadora.

A pesar de las ventajas teóricas del riego deficitario, la formulación del problema de investigación radica en la apremiante necesidad de conciliar la rentabilidad económica y la competitividad del arándano con la conservación a largo plazo de los recursos suelo y agua bajo un enfoque de gestión sostenible. En valles áridos como Chavimochic, la restricción en el volumen de riego puede potenciar el riesgo de salinización del suelo si no se implementan fracciones de lavado adecuadas o estrategias complementarias de monitoreo hidrosalino, generando un dilema técnico entre el ahorro hídrico y la sanidad edáfica.

Por consiguiente, el presente artículo tiene como objetivo analizar el estado del arte sobre la optimización de la huella hídrica y la mitigación de la salinidad del suelo mediante la implementación de sistemas de riego deficitario controlado en Vaccinium corymbosum en el valle de Chavimochic, integrando consideraciones fisiológicas, agronómicas y ambientales que sustenten una agricultura más resiliente en la región.

METODOLOGÍA

El presente trabajo se enmarca bajo un diseño de investigación bibliográfica, adoptando específicamente el tipo de estudio correspondiente a una revisión narrativa de la literatura científica y técnica. Este enfoque metodológico resulta altamente idóneo para examinar, interpretar y sintetizar el estado del arte sobre la optimización de los recursos hídricos y edáficos, permitiendo integrar múltiples perspectivas teóricas y hallazgos empíricos publicados en torno al manejo del arándano en condiciones de aridez.

Para garantizar la rigurosidad y exhaustividad en la recolección de los antecedentes, se estableció una estrategia de búsqueda de información estructurada en diversas plataformas académicas de alto impacto. La exploración bibliográfica abarcó bases de datos científicas internacionales de corriente principal, tales como Scopus, Web of Science, SciELO y el motor de búsqueda especializada Google Scholar. La recuperación de los registros se fundamentó en la aplicación sistemática de palabras clave y términos de búsqueda vinculados mediante operadores booleanos avanzados (AND, OR), utilizando descriptores específicos normalizados relacionados con: "Vaccinium corymbosum", "riego deficitario controlado", "huella hídrica", "salinidad del suelo" y "valle de Chavimochic".

Con el propósito de filtrar y depurar los documentos obtenidos, se definieron criterios de inclusión y exclusión precisos. Dentro de los criterios de inclusión, se consideraron investigaciones científicas originales, revisiones sistemáticas, tesis de posgrado y reportes técnicos oficiales publicados preferentemente en la última década (2016-2026), con la finalidad de asegurar la vigencia temporal de la información. Asimismo, se seleccionaron estudios enfocados en cultivos arbustivos leñosos sometidos a esquemas de riego tecnificado, investigaciones desarrolladas en regiones áridas o semiáridas con similitudes edafoclimáticas a la costa peruana, y literatura específica que abordara la gestión agrícola del arándano en los valles de la costa norte del Perú. Por el contrario, los criterios de exclusión contemplaron la eliminación de estudios orientados a cultivos hortícolas no leñosos cuyas respuestas fisiológicas al estrés hídrico difieren sustancialmente de las especies arbustivas, artículos que carecían de rigor metodológico comprobable o trazabilidad en sus datos, y publicaciones geográficamente contextualizadas en zonas húmedas o templadas sin relevancia para los agroecosistemas desérticos.

Finalmente, todo el volumen de información seleccionado fue procesado mediante

un protocolo de síntesis y análisis cualitativo. Este procedimiento consistió en una categorización temática rigurosa de los datos recolectados, agrupando los hallazgos en ejes analíticos sobre dinámica hídrica, respuestas fisiológicas, contabilidad de la huella hídrica y salinidad edáfica. Dicha estructuración permitió contraponer los antecedentes teóricos y experimentales para construir una discusión crítica fundamentada, orientada a evaluar la viabilidad de las estrategias de riego deficitario en el valle de Chavimochic.

RESULTADOS

El análisis de la dinámica hídrica y los requerimientos de Vaccinium corymbosum en el valle de Chavimochic evidencia que el entorno se emplaza en una zona árida caracterizada por una escasez casi nula de precipitaciones anuales y una alta demanda evaporativa atmosférica (Allen et al., 1998; Proyecto Especial Chavimochic - PECH, 2025). Ante este escenario, el sistema radicular superficial y fasciculado del arándano presenta una extrema vulnerabilidad frente al estrés hídrico, al carecer de raíces profundas capaces de explorar perfiles edáficos distantes (Strik & Yarborough, 2005). La cuantificación inicial de la huella hídrica asociada al paquete tecnológico convencional revela una fuerte dependencia de la huella azul por el uso intensivo de agua de riego, mientras que la huella verde es insignificante y la gris se incrementa debido al uso masivo de fertilizantes nitrogenados y sintéticos (Mekonnen & Hoekstra, 2011; XynergICA, 2022).

En cuanto a los efectos fisiológicos y agronómicos del Riego Deficitario Controlado (RDC), las investigaciones demuestran que las reducciones programadas del volumen de riego inducen respuestas adaptativas en el arándano, tales como el ajuste osmótico, el cierre estomático temprano y descensos en el potencial hídrico foliar (Romero & Fernández, 2020). La identificación de etapas fenológicas críticas, particularmente la floración, el cuajado y el llenado de fruta, demuestra que cualquier restricción hídrica drástica en estas fases provoca mermas severas en el rendimiento comercial y una reducción inaceptable en el calibre del fruto (Erb et al., 1993; Sandoval-Villa et al., 2018). Por ello, las estrategias de programación del riego deben sustentarse en el uso de sensores de alta precisión para medir la humedad del suelo y el estado hídrico de la planta (Jones, 2004).

Respecto al impacto del RDC sobre la huella hídrica en agroecosistemas áridos, la aplicación de esta técnica genera una reducción neta significativa en el volumen

de agua aplicado por hectárea, lo que se traduce directamente en una disminución sustancial de la huella hídrica azul (Chai et al., 2016). Asimismo, se observa una mejora notable en la eficiencia en el uso del agua (WUE) bajo esquemas de riego deficitario en comparación con los regímenes de riego pleno tradicional, optimizando la productividad por cada metro cúbico consumido (Geerts & Raes, 2009).

Finalmente, la relación entre el manejo del riego y la salinidad del suelo advierte sobre los mecanismos de acumulación de sales en la rizósfera causados por una menor fracción de lavado en sistemas de riego deficitario (Maas & Grattan, 1999). Para prevenir la salinización y sodificación de los suelos en Chavimochic, es indispensable integrar estrategias agronómicas complementarias, como riegos de lavado estacionales y un manejo eficiente de fertilizantes (Shani et al., 2007). Dicha gestión debe sintonizar la interacción compleja entre el estrés salino y el estrés hídrico, factores que actúan de manera sinérgica limitando la tolerancia fisiológica del cultivo (Munns & Tester, 2008).

DISCUSIÓN

El análisis y contraste de hallazgos revela una divergencia importante entre la efectividad del riego deficitario controlado (RDC) documentada en la literatura internacional y las restricciones específicas del valle de Chavimochic. Mientras que estudios globales reportan un éxito consistente del RDC en diversas zonas hortícolas (Chai et al., 2016; Geerts & Raes, 2009), la aplicación de esta técnica en la costa norte peruana se encuentra condicionada por la particularidad de los suelos locales y la calidad variable del agua de riego. Como señalan Silva et al. (2021), la presencia de sales disueltas en fuentes hídricas superficiales y subterráneas de la región altera sustancialmente las respuestas fisiológicas observadas en ensayos controlados de otras latitudes, incrementando el riesgo de toxicidad por iones específicos en el cultivo de arándano (Vaccinium corymbosum).

En cuanto a las ventajas y limitaciones, la implementación del RDC ofrece beneficios económicos y ambientales innegables, destacando un ahorro significativo del recurso hídrico y una optimización en la eficiencia de uso del agua, lo cual reduce la huella

hídrica azul de la agroexportación (Mekonnen & Hoekstra, 2011). Asimismo, un control adecuado del riego disminuye las tasas de percolación profunda, limitando la lixiviación masiva de nitratos y otros nutrientes hacia los mantos freáticos (Shani et al., 2007). Sin embargo, estas ventajas contrastan con severos riesgos operacionales. Una imprecisión en la calendarización del déficit hídrico puede desencadenar una pérdida acelerada de la calidad de la fruta por deshidratación osmótica o inducir un estrés salino excesivo en la rizósfera, afectando drásticamente el calibre comercial y el valor exportable del arándano (Romero & Fernández, 2020; Sandoval-Villa et al., 2018).

Respecto a los desafíos técnicos para el agricultor, la adopción a gran escala del RDC en la región de La Libertad enfrenta una marcada brecha tecnológica. A diferencia de las grandes corporaciones agroindustriales, los medianos y pequeños productores del valle suelen carecer de la infraestructura y el capital necesarios para integrar sistemas automatizados de monitoreo en tiempo real de la humedad y la salinidad del suelo a nivel de predio (Strik & Yarborough, 2005). Esta limitación instrumental dificulta la ejecución precisa de los umbrales de riego deficitario, incrementando el error humano y la probabilidad de dañar irreversiblemente el sistema radicular superficial del cultivo (Jones, 2004).

Finalmente, las perspectivas futuras subrayan la imperiosa necesidad de desarrollar investigaciones locales a largo plazo en el ámbito del Proyecto Especial Chavimochic. Es fundamental evaluar empíricamente el impacto acumulativo del RDC sobre la salud física, química y biológica del suelo, así como sobre la sostenibilidad cuantitativa y cualitativa del acuífero regional (Proyecto Especial Chavimochic - PECH, 2025). Solo mediante validaciones científicas adaptadas al contexto edafoclimático peruano será posible consolidar el riego deficitario como un pilar técnico de la agricultura sostenible (Munns & Tester, 2008).

CONCLUSIÓN

El riego deficitario controlado se consolida como una estrategia viable y altamente efectiva para reducir la huella hídrica azul en el cultivo de arándano (Vaccinium corymbosum) en el valle de Chavimochic, permitiendo optimizar el recurso hídrico disponible sin comprometer severamente la rentabilidad comercial de la agroexportación en la región La Libertad.

No obstante, su implementación exitosa y sostenible en el tiempo depende críticamente de un monitoreo riguroso y constante de la conductividad eléctrica y el estado hídrico del suelo. Este control es indispensable para mitigar y evitar los procesos acelerados de salinización de la rizósfera, los cuales se derivan naturalmente de una menor fracción de lavado bajo esquemas de restricción de riego.

Por consiguiente, la adopción estructurada de estas prácticas agronómicas fomenta de manera directa la resiliencia climática y la seguridad hídrica a largo plazo de la agroindustria moderna en la costa norte peruana, transformando los desafíos edafoclimáticos en oportunidades de gestión ambiental eficiente.

REFERENCIAS

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements* (FAO Irrigation and Drainage Paper 56). Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Booth, A., Sutton, A., & Papaioannou, D. (2016). *Systematic approaches to a successful literature review (2nd ed.)*. SAGE Publications.

Casierra-Posada, F., & García, J. (2005). Efecto del estrés por salinidad sobre el crecimiento en plantas de fresa (Fragaria sp.). *Agronomía Colombiana,* 23(1), 32-39.

Chai, Q., Gan, Y., Zhao, C., Xu, H. L., Waskom, R. M., Niu, Y., & Siddique, K. H. M. (2016). Regulated deficit irrigation for crop water-saving and yield maximization: A review. *Agronomy for Sustainable Development,* 36(1), Article 3. https://doi.org/10.1007/s13593-015-0348-4

Erb, A., Barden, J. A., & Patten, K. D. (1993). Regulated deficit irrigation affects growth and fruit quality of rabbiteye blueberries. *HortScience,* 28(10), 1002-1004.

Geerts, S., & Raes, D. (2009). Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural Water Management*, 96(9), 1275-1284. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.04.009

Grant, M. J., & Booth, A. (2009). A typology of reviews: an analysis of 14 review

types and associated methodologies. *Health Information & Libraries Journal,* 26(2), 91-108. https://doi.org/10.1111/j.1471-1842.2009.00848.x

Greenhalgh, T., Thorne, S., & Malterud, K. (2018). The stanford meta-narrative review: accelerating the translation of evidence in the health sciences. *Journal of Clinical Epidemiology,* 95, 10-18. https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2017.10.012

Jones, H. G. (2004). Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany,* 55(407), 2427-2436. https://doi.org/10.1093/jxb/erh213

Maas, E. V., & Grattan, S. R. (1999). *Crop yields as affected by salinity*. In R. W. Skaggs & J. van Schilfgaarde (Eds.), Agricultural Drainage (pp. 55-108). American Society of Agronomy.

Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2011). The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(5), 1577-1600. https://doi.org/10.5194/hess-15-1577-2011

Montero, I., & León, O. G. (2007). Guía para nombrar los estudios de investigación en psicología. *International Journal of Clinical and Health Psychology*, 7(3), 847-862.

Munns, R., & Tester, M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology,* 59, 651-681. https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. BMJ, 372, n71. https://doi.org/10.1136/bmj.n71

Proyecto Especial Chavimochic - PECH. (2025). Impulsan innovación agrícola con cultivo de arándanos en los valles de Chao y Virú. Gobierno Regional La Libertad. https://www.gob.pe/institucion/chavimochic/noticias/1229568-impulsan-innovacion-agricola-con-cultivo-de-arandanos

Romero, P., & Fernández, F. (2020). Study of the Quality Attributes of Selected

Blueberry (Vaccinium corymbosum L.) Cultivars under Deficit Irrigation *Regimes. Applied Sciences,* 10(23), 8459. https://doi.org/10.3390/app10238459

Sandoval-Villa, M., Trejo-Téllez, L. I., & Vázquez-Alarcón, A. (2018). Resistencia agronómica al estrés osmótico en arándano (Vaccinium corymbosum L.). *Revista Fitotecnia Mexicana*, 41(2), 231-240. https://doi.org/10.35196/rfm.2018.2.231-240

Shani, U., Ben-Gal, A., Tripler, E., & Dudley, L. M. (2007). Plant response to the combined effect of salinity and transpiration. *Water Resources Research,* 43(7), W07404. https://doi.org/10.1029/2006WR005370

Silva, J., Pérez, R., & Meza, F. (2021). Desafíos del riego tecnificado y manejo de la salinidad en suelos agrícolas de la costa peruana. *Revista Chilena de Ingeniería Agrícola*, 13(2), 45-58.

Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104, 333-339. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039

Strik, B. C., & Yarborough, D. E. (2005). Blueberry production delegated in North America and South America. *HortTechnology,* 15(2), 393-398.

Whittemore, R., & Knafl, K. (2005). The integrative review: updated methodology. *Journal of Advanced Nursing*, 52(5), 546-553. https://doi.org/10.1111/j.1365-2648.2005.03621.x

XynergICA. (2022). *Exportaciones de arándanos peruanos enfrentan desafíos de sostenibilidad en la agroindustria moderna*. Asociación Civil XynergICA. https://www.xynergica.pe/2022/11/09/exportaciones-de-arandanos-peruanos-enfrentan-desafios-de-sostenibilidad/