

Mejorando la eficiencia logística en plantaciones de palma: modelo de optimización espacial para puntos de recolección de racimos de fruta fresca

Carlos Ricardo Bojacá^{1*}, Diego Alejandro Hernández², Andrés Alejandro Tupaz-Vera³, Jhonatan Eduardo Camperos-Reyes²

¹Área de Geomática, *Autor para correspondencia: cbojaca@cenipalma.org; ²Unidad de Validación de Resultados de Investigación, Corporación Centro de Investigación en Palma de Aceite, Cenipalma, ³Campo Experimental Palmar de las Corocoras

Introducción

La competitividad de la industria de palma de aceite en países como Colombia está limitada por altos costos de producción, especialmente laborales, en comparación con los principales productores, Malasia e Indonesia (Mosquera-Montoya *et al.*, 2019). La cosecha representa entre el 18 % y 20 % de los costos totales de producción en el cultivo colombiano, con aproximadamente el 85 % de estos costos asociados a mano de obra, convirtiéndola en la actividad más intensiva en trabajo dentro del agronegocio de la palma (Mosquera-Montoya *et al.*, 2023).

La variabilidad espacio-temporal en el rendimiento de la palma de aceite está influenciada por factores ambientales, de manejo y endógenos. Factores como el déficit de presión de vapor y la ineficiencia en el uso del agua se relacionan con rendimientos reducidos, particularmente durante períodos críticos de crecimiento (Monzon *et al.*, 2022). Esta heterogeneidad afecta las prácticas de cosecha y la logística asociada, donde los racimos cosechados son transportados a puntos de recolección de fruta, habitualmente contenedores con capacidad de 7-8 toneladas (Soesatrijo, 2023). En el contexto de escasez global de mano de obra agrícola y la necesidad de mejorar la eficiencia laboral, este estudio propone una metodología basada en técnicas de investigación de operaciones para optimizar la ubicación de los acopios de recolección de fruta, considerando la variabilidad espacio-temporal de la producción, el diseño de la plantación y la infraestructura vial disponible.

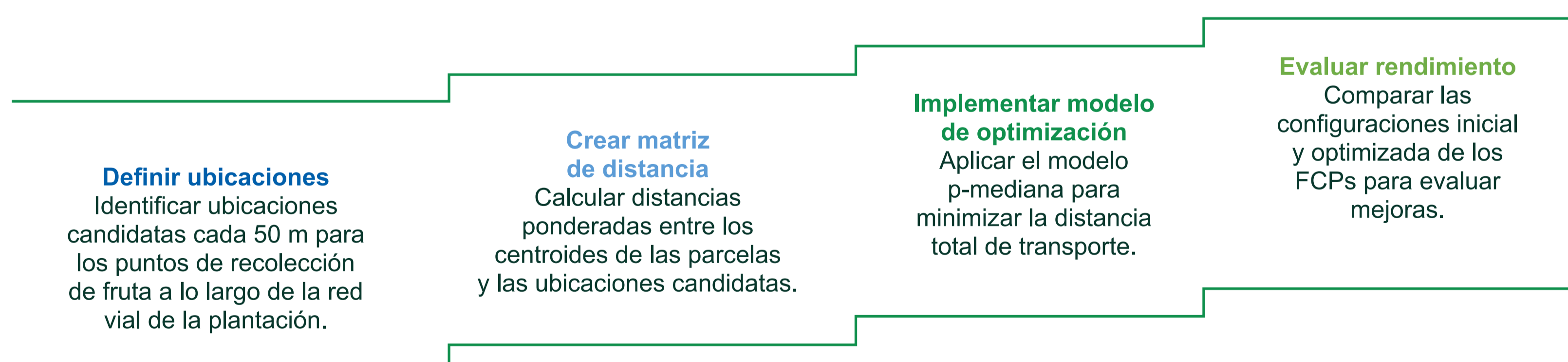
Objetivo general

Desarrollar e implementar una metodología de optimización espacial para determinar la ubicación estratégica de los puntos de acopio de fruta en plantaciones de palma de aceite, considerando la variabilidad del rendimiento y las restricciones de productividad laboral, con el fin de mejorar la eficiencia logística de las operaciones de cosecha.

Metodología

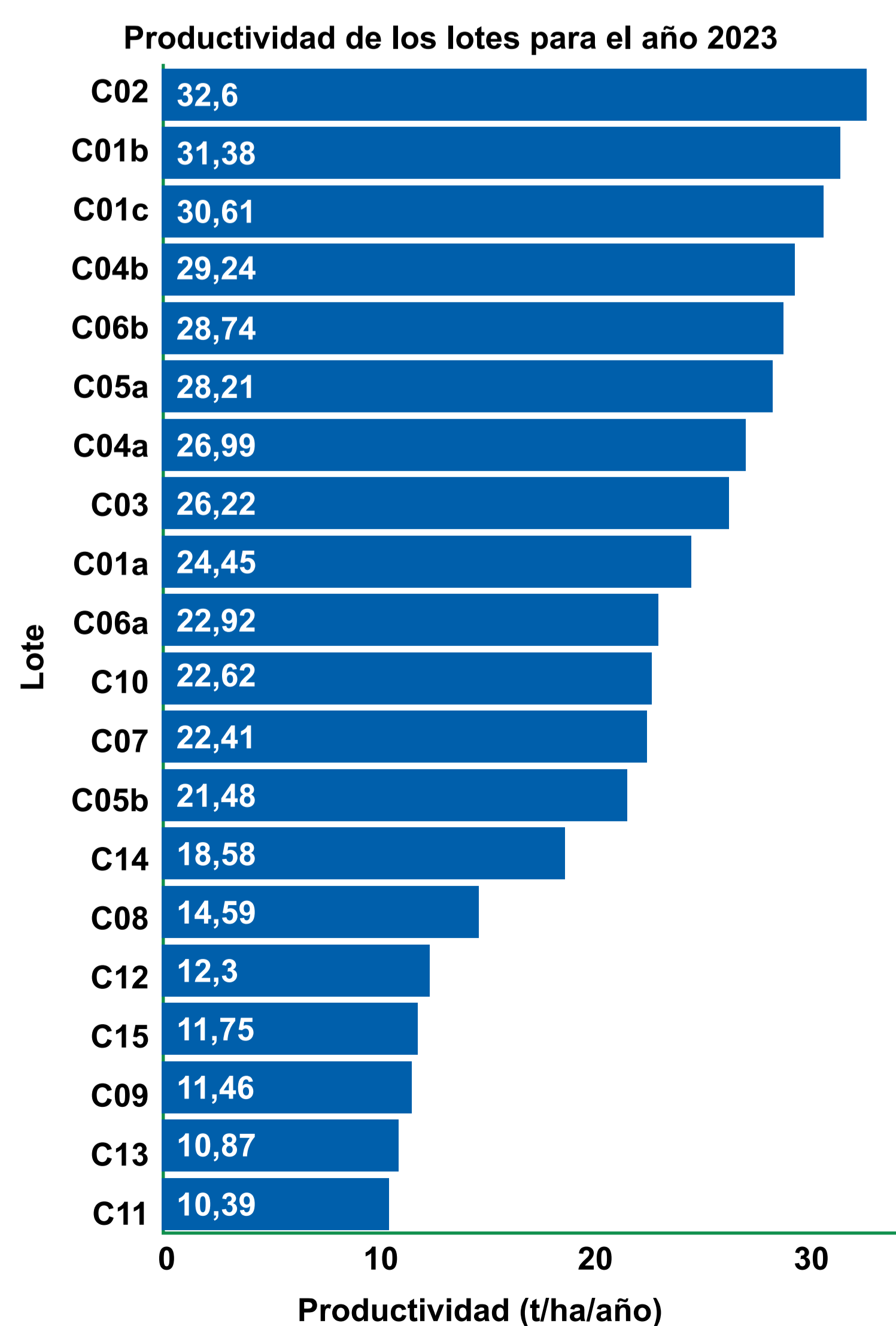
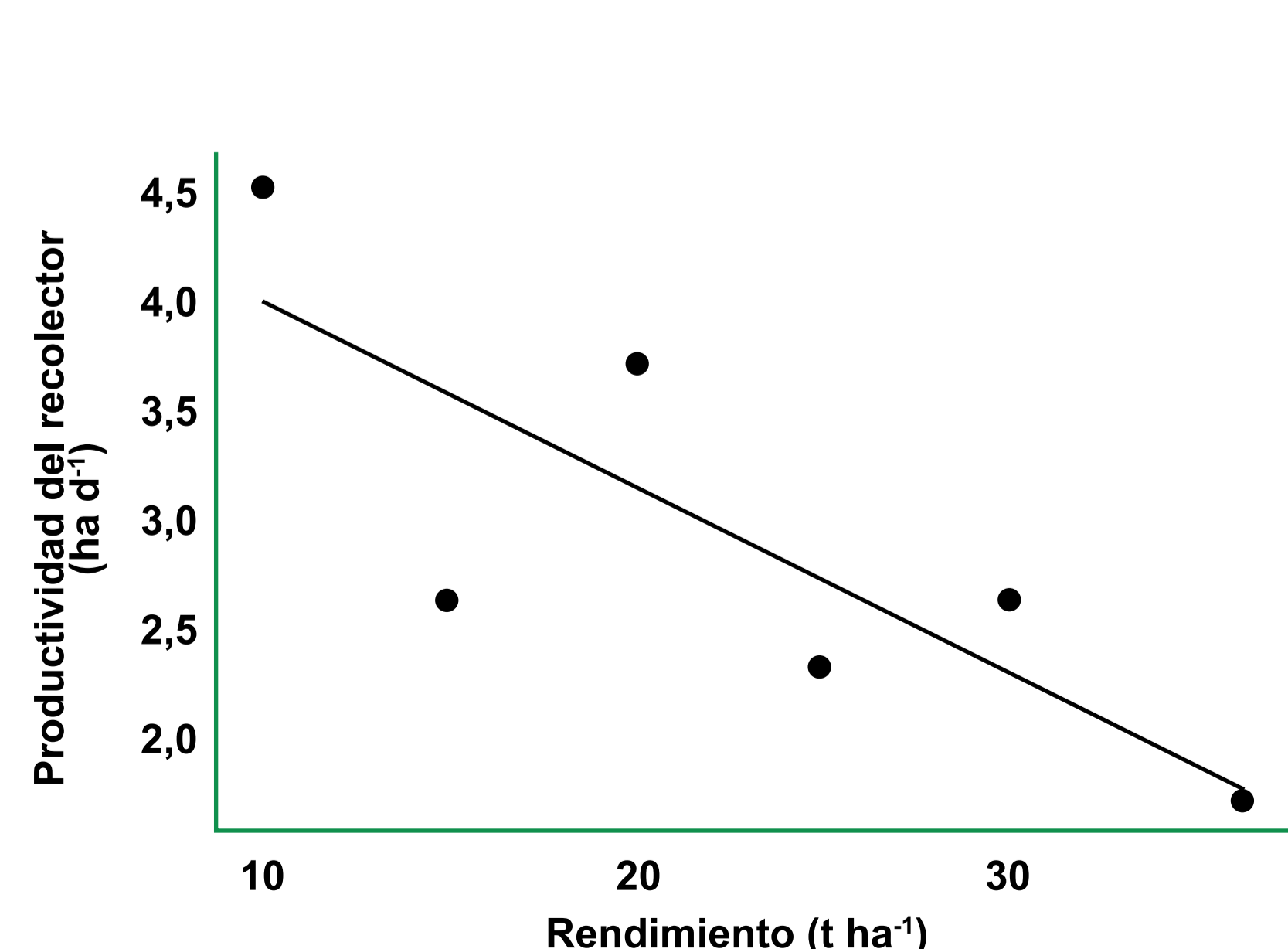
Se utilizó un modelo p-mediana para optimizar la ubicación de puntos de acopio de fruta en una plantación de 148.1 hectáreas de palma aceitera (18 parcelas) en el Campo Experimental Palmar de las Corocoras. El estudio caracterizó la relación entre productividad de los lotes y eficiencia de cosecha mediante análisis de regresión, subdividiendo las parcelas en unidades operativas usando algoritmo k-means según la capacidad de trabajo de los equipos de cosecha (cortador y recolector con búfalo). Las ubicaciones potenciales para los siete acopios se generaron sistemáticamente cada 50 metros a lo largo de la red vial existente.

Se calculó una matriz de distancia ponderada por costos entre los centroides de sublotos y posibles ubicaciones de acopios, considerando las tarifas diferenciales de pago. El modelo p-mediana se implementó en Python (PuLP) para minimizar la distancia total ponderada entre 47 puntos de cosecha y los 7 acopios seleccionados entre 97 ubicaciones potenciales. La evaluación comparó las métricas de distancia entre las configuraciones inicial y optimizada.



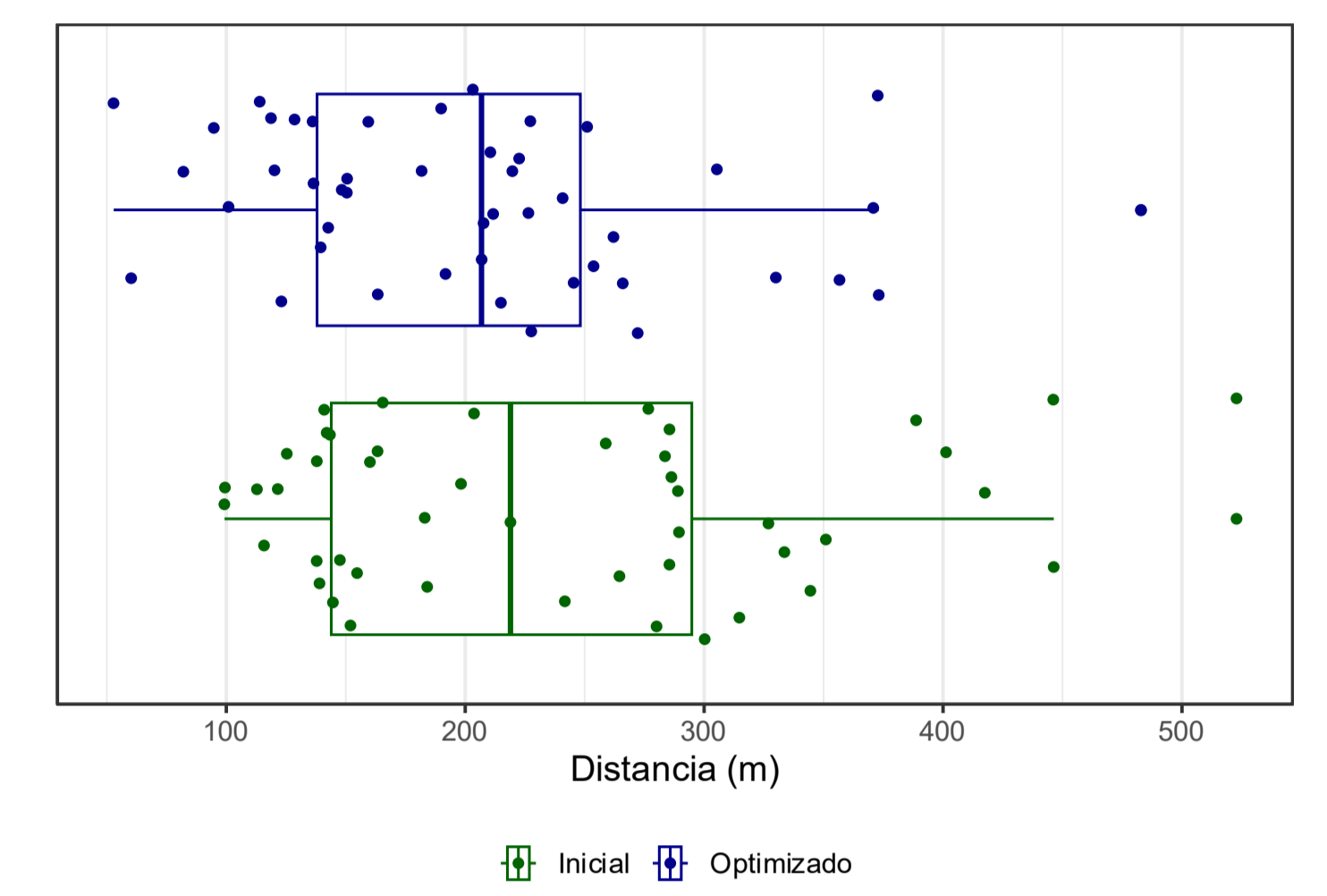
Distribución del rendimiento anual de racimos de fruta fresca en los lotes de la plantación. Los valores representan la producción del año 2023. La distribución espacial del rendimiento orientó la subdivisión de lotes en unidades operativas y la asignación diferencial de costos de transporte para el modelo de optimización.

Relación entre el rendimiento de RFF de la parcela y la productividad de los recolectores. Los puntos representan los datos de campo observados y la línea continua muestra el modelo de regresión lineal ajustado.



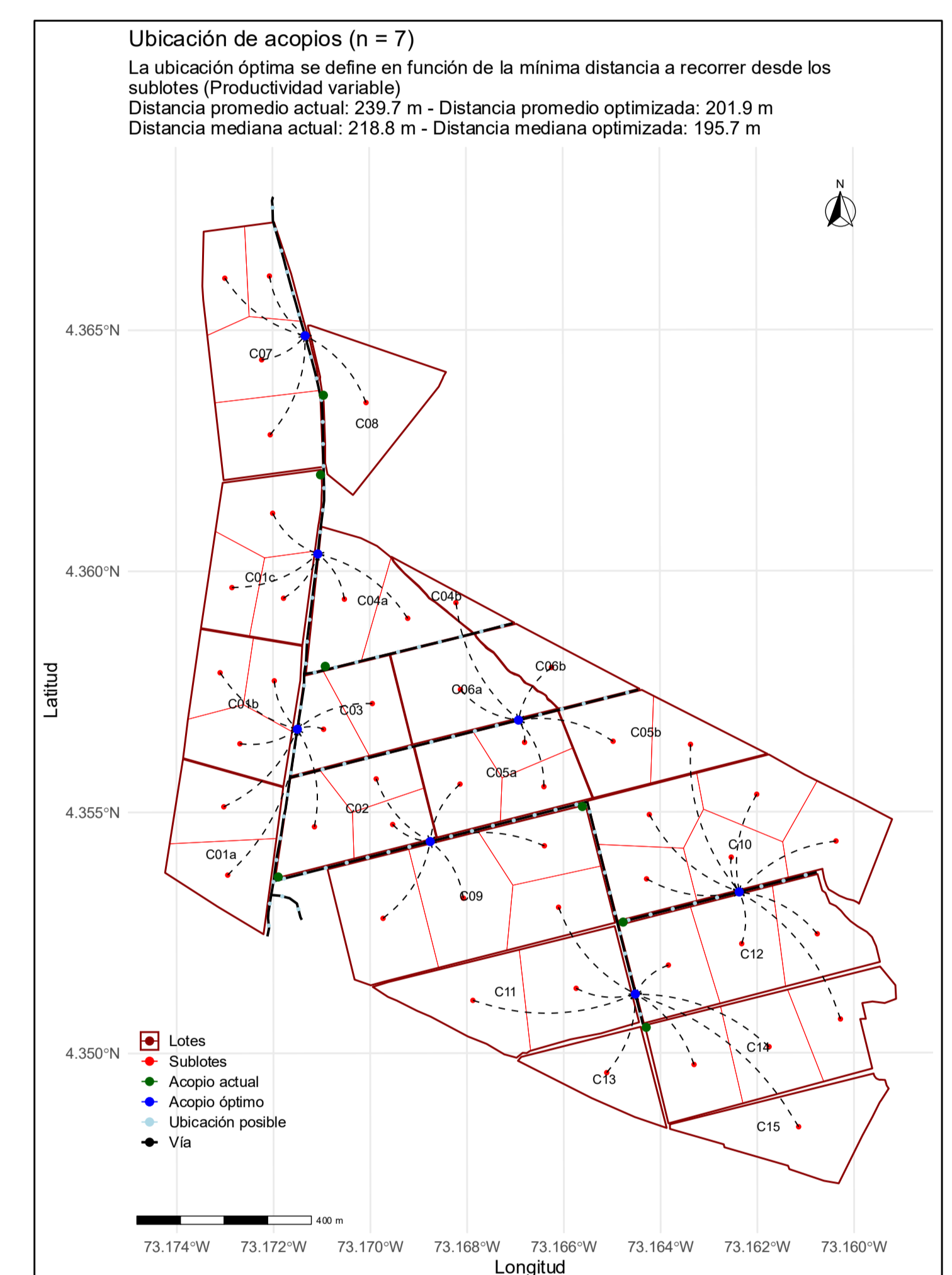
Resultados y discusión

El análisis de las operaciones de cosecha reveló una significativa relación lineal negativa ($R^2 = 0,66$) entre la productividad de la parcela y el área que podía ser eficientemente atendida por un recolector. En parcelas con rendimiento de 10 t ha^{-1} , los recolectores podían cubrir aproximadamente $4,0 \text{ ha día}^{-1}$, mientras que esta capacidad disminuía a $1,7 \text{ ha día}^{-1}$ en parcelas con producción de 30 t ha^{-1} . Esta relación inversa refleja directamente la dinámica operativa de recolección y transporte de racimos de fruta fresca: en parcelas de alto rendimiento, los recolectores deben realizar viajes más frecuentes para transportar el mayor volumen de fruta cosechada a los acopios, resultando en una reducción del área de cobertura diaria.



El modelo de optimización p-mediana identificó nuevas ubicaciones para los siete puntos de recolección de fruta a lo largo de la red vial de la plantación, manteniendo la cobertura de todas las áreas de producción mientras reducía significativamente las distancias de transporte.

La optimización logró una mejora sustancial en la eficiencia del transporte, reduciendo la distancia media desde los centroides de los sublotos hasta sus acopios asignados de $239,7 \text{ m}$ a $201,9 \text{ m}$, representando una disminución del 15,8 %. De manera similar, la distancia mediana disminuyó de $218,8 \text{ m}$ a $195,7 \text{ m}$, indicando una mejora del 10,6 %.



La distribución más compacta de distancias en la configuración optimizada sugiere una cobertura de servicio más equitativa en toda la plantación, lo que podría contribuir a condiciones de trabajo más consistentes para los equipos de cosecha y, potencialmente, tiempos de evacuación de fruta más uniformes.

Conclusiones

- La relación demostrada entre la productividad de la parcela y la eficiencia de cosecha, combinada con la ubicación optimizada de los puntos de recolección, ofreció un enfoque basado en datos para mejorar la logística de la plantación que podría ser particularmente valioso a medida que la industria enfrenta crecientes costos laborales y presiones de eficiencia.
- Esta metodología de optimización espacial es particularmente útil para plantaciones en expansión o replantación, permitiendo planificar eficientemente tanto la red vial como la ubicación inicial de acopios. La relación identificada entre patrones de rendimiento y eficiencia operativa sugiere que las prácticas de agricultura de precisión, además de su impacto en la producción, podrían mejorar significativamente la logística de cosecha.
- La integración de aspectos operativos en el manejo de plantaciones es crucial, ya que la interacción entre rendimiento variable, eficiencia laboral y ubicación de infraestructura genera efectos en cascada en todo el sistema productivo. Este enfoque integrado de optimización será cada vez más valioso para la competitividad en la industria palmera, con potencial para adaptarse a otros aspectos logísticos como rutas de transporte o asignación de equipos según características de los lotes.

Referencias bibliográficas

- Monzon, J. P., Jabloun, M., Cock, J., Caliman, J. P., Couëdel, A., Donough, C. R., Vui, P. H. V., Lim, Y. L., Mathews, J., Oberthür, T., Prabowo, N. E., Edreira, J. I. R., Sidhu, M., Slingerland, M. A., Sugianto, H., & Grassini, P. (2022). Influence of weather and endogenous cycles on spatiotemporal yield variation in oil palm. *Agricultural and Forest Meteorology*, 314, 108789.
- Mosquera-Montoya, M., López, D., Ruiz, E., Valderrama, M., & Castro, L. (2019). Mano de obra en cultivos de palma aceitera en Colombia: participación en el costo de producción y demanda. *Palmas*, 40(1), 46–53.
- Mosquera-Montoya, M., Munévar Martínez, D. E., Ruíz Álvarez, E., Fontanilla-Díaz, C. A., Salamanca, Ó. H., & Obregón Esguerra, J. M. (2023). Labor productivity assessment of three different mechanized harvest systems in Colombian oil palm crops. *OCL*, 30(4), 15.
- Soesatrijo, J. (2023). Implementation of Bin System Units for Efficient Harvest Transportation in the Palm Oil Agroindustry. *SITEKIN: Jurnal Sains, Teknologi Dan Industri*, 20(2), 721–728.

Agradecimientos

Al Fondo de Fomento Palmero, administrado por Fedepalma, por la financiación recibida para la realización de este trabajo.

La información contenida en este póster es responsabilidad de los autores

CON EL APOYO DEL FONDO DE FOMENTO PALMERO