

# Aplicación del principio de centro de gravedad (centro geométrico-centroide) para la optimización de recorridos e inicio de operaciones en clúster de aplicación de fertilizante\*

Application of the Center of Gravity Principle (Geometric Center-Centroid) to Optimize Travel and Starting Times Using Fertilizer Application Clusters



**SERGIO D. CASTRO G.**  
Líder Departamento Técnico y  
Desarrollo, Verion Colombia  
Leader Technical and Development  
Department

**AUTORES:** Castro, S. D. & Socha, A. H.

**CITACIÓN:** Castro, S. D., & Socha, A. H. (2019). Aplicación del principio de centro de gravedad (centro geométrico-centroide) para la optimización de recorridos e inicio de operaciones en clúster de aplicación de fertilizante. *Palmas*, 40 (Especial, tomo I), 168-176.

**PALABRAS CLAVE:** optimización, planeación, agricultura de precisión, GPS, SIG, análisis de datos.

**KEYWORDS:** Optimization, planning, precision agriculture, GPS, GIS, data analysis.

\*Artículo original recibido en español.

## Resumen

El desarrollo de la sostenibilidad empieza con hacer cada vez más eficientes y rentables nuestros procesos productivos, buscando la reducción del impacto ambiental que generan las operaciones de maquinaria agrícola en el cultivo de palma de aceite. A lo largo de los años, en Colombia la planeación de las faenas agrícolas se realizó con base en experiencias previas e intuición de recorridos en función de cumplir con la tarea asignada. En la producción moderna agrícola hace falta una planeación estratégica basada en datos reales que permita explotar el potencial de los equipos disponibles, minimizando el costo de operación y optimizando el tiempo de recorrido. Con el sistema de monitoreo Verion (Vcom5.6) Gps novatel 10hz instalado en un tractor Massey Ferguson 292 Advance 105hp, se adquirieron los datos de recorrido de la labor de fertilización durante dos años equivalentes a las

últimas 12 campañas realizadas en una finca palmera ubicada en el departamento de Casanare, con una extensión total de 1.164 hectáreas. Verificando los recorridos por campaña se encontró que en los registros verificados se tiene como velocidad promedio 5,8 km/h con una tasa de avance promedio diaria de 54,2 ha. Resumiendo las fechas de trabajo en los lotes, se encuentra que con un promedio de trabajo de 10,4 horas se logra la aplicación total en 22 días, de los cuales 15 % del tiempo se ejecutó en traslados, lo que en el total de las aplicaciones anuales representa 15 días de trabajo.

## Abstract

Sustainability is based on more efficient and profitable productive processes that pursue the reduction of the environmental impact caused by the use of agricultural machinery in oil palm plantations. Traditionally, agricultural activities in Colombia have been planned on the basis of prior experiences and intuition in order to accomplish the assigned tasks. Modern production requires strategic planning based on actual data that facilitate the use of equipment to its fullest potential, thus minimizing operation costs and optimizing travel times. Data on travel times required for fertilization campaigns were obtained using a Verion monitoring system (Vcom5.6) Novatel GPS, 10 Hz, mounted on a Massey Ferguson 292 Advanced tractor, 105 hp, during the past 2 years. This period covered the last 12 fertilization campaigns conducted in a 1,164 ha oil palm plantation located in Yopal, Casanare (Colombia). Once travel times were verified, we found that recorded average speed was 5.8 km/h at an average daily movement rate of 54.2 ha. By summarizing fertilization dates on the plots, we found that during 10.4 hours of work the total application was carried out in 22 days, with 15 % of the time spent in travel time. This represents 15 working days for total yearly application.

## Introducción

Con el desarrollo de la actividad productiva, la necesidad de ser cada día más eficientes en todos los procesos y operaciones agrícolas ha ganado gran importancia. Una de las tareas primordiales que enfrentamos continuamente es la planeación y ejecución de labores mecanizadas en campo. El desarrollo, mantenimiento y cuidado de nuestro cultivo se convierte en un desafío permanente. La fertilización es fundamental para tener un cultivo de palma de aceite de alto rendimiento, convirtiéndose en una constante durante toda la vida del mismo. Dicha labor se ha realizado manualmente; sin embargo, la mecanización de esta y otras actividades se ha convertido en tendencia en los últimos años, ganando espacio a nivel nacional. Con sistemas de automatización y geoposicionamiento integrados en máquinas precisas, se ha logrado recolectar valiosa información de campo que permite comenzar a identificar tiempos, movimientos y relaciones de gestión de maquinaria que antes no eran visibles por

la dificultad de realizar mediciones confiables y continuas con respecto a las tareas ejecutadas en campo.

Con los datos recolectados podemos entrar en la fase de procesamiento de la información y análisis, tal como mencionan Peart (2004) y Bochtis, Sørensen & Busato (2014). Es así como se plantea el uso del concepto de centro geométrico (centroide) para la determinación de puntos estratégicos de inicio de labor y optimización de recorridos en la tarea específica de fertilización.

## Adquisición de datos

El sistema de adquisición de datos está integrado por el sistema de control VERION, que consta de tres componentes básicos entre los que se cuenta VE-FIPS (fuente de poder), Vcom 5.6 (computadora para el registro de datos) y GPS Novatel (antena GPS 10 HZ- L1) (georreferencia). El funcionamiento consta de alimentación a 12 voltios instalada sobre un tractor Massey Ferguson 292 Advance, a partir del cual se toma la energía para distribuirla hacia el Vcom 5.6 y

la antena GPS Novatel, que generalmente tienen una tasa de transferencia de datos de 57.600 baudios. Este flujo de datos lo recibe el Vcom, en el que previamente se crea un archivo de almacenamiento y una matriz de datos, a los que asigna las coordenadas obtenidas por el GPS y los estados en los que se encuentra el sistema de control. Dichos estados pueden ser: trabajo, traslado, parado y una señal de alarma especial para condiciones anómalas del sistema.

El sistema de adquisición funciona básicamente como un flujo continuo de información con comunicación constante que registra: posición, estado, velocidad, tiempo, altura, HDOP<sup>1</sup>, dosis teórica<sup>2</sup> y dosis real<sup>3</sup> de los actuadores que tenga instalado.

## Metodología

### Centros de gravedad: determinación de zona

En la ingeniería existen diferentes tipos de centroides como por ejemplo centro de masa, centro de presión y centro de gravedad. Aunque todos constan de coordenadas que ubican un punto, representan conceptos diferentes debido a la variable que simbolizan, donde su posición coordenada puede variar dependiendo de la distribución del atributo de estudio. Por ejemplo, cuando estudiamos el centro de presión de una figura que tiene asociado un sistema de fuerzas que actúan sobre él, este centro estará ubicado en la resultante de dicho sistema, modulado por la distribución que tenga el sistema de fuerzas dentro de la figura.

Cuando abordamos el problema de distribución espacial en perímetros y parcelas palmeras, se debe trabajar desde una superficie plana donde su atributo de densidad puede ser función de atributos de altura o estado del lote, en razón a la variabilidad espacial registrada por los datos (Esposito *et al.*, 2012). Así, delimitar zonas basados en atributos topográficos

y/o propiedades físicas del suelo captura la variabilidad del rendimiento debido a las diferencias de agua disponible para la planta y, por lo tanto, el potencial de producción de cultivos.

Para el cálculo del centroide existen diferentes métodos pero usaremos el de integración para ampliar el concepto, y como herramienta de cálculo el sistema de información geográfica que permite encontrar las coordenadas de cada punto de manera práctica, empleando así la fórmula de integral coordenada (Ec 1):

$$\bar{x} = \frac{1}{A} \int_a^b \frac{1}{2} \{[F(y)]^2 - [g(y)]^2\} dy,$$

$$\bar{y} = \frac{1}{A} \int_a^b y \{[F(y)] - [g(y)]\} dy,$$

Donde A = área total del polígono, integrando desde a hasta b siendo estos puntos coordenados pertenecientes a las funciones f(y) y g(y) que delimitan el área de los polígonos requeridos, determinando el área de cada lote de estudio.

Basados en mapas de elevación se fracciona el campo en grupos naturales, partiendo de un número de zonas específico mediante el *software* MZA<sup>4</sup>, el cual, a través de los índices de clasificación entrópica normalizada (NCE)<sup>5</sup>, modela la cantidad de desorganización de una partición C difusa en Y (Fridgen, 2003) y el fuzziness performance index (FPI); además de otros atributos topográficos (Figura 1).

Para verificar la variabilidad espacial de estos parámetros en el campo de estudio se toma la densidad constante para las superficies planas en este caso de estudio, donde se encuentra que el índice de fuzzy es cercano a 1, lo cual genera clases no significativas para delimitar diferentes zonas y con base en ellas asignar densidad diferenciada para el análisis con el centroide.

1 Parámetro que cuantifica la incertidumbre en el posicionamiento de un receptor GPS en el plano horizontal debido a la posición relativa de los satélites (*Horizontal Dilution of Precision*, en inglés).  
2 Dosis configurada en el sistema de control para ser realizada por la máquina.

3 Dosis ejecutada efectiva por el sistema de control instalado en la máquina.  
4 Management Zone Analyst Software for subfield Management Zone Delineation USDA.  
5 NCE clasificación normalizada entropía.

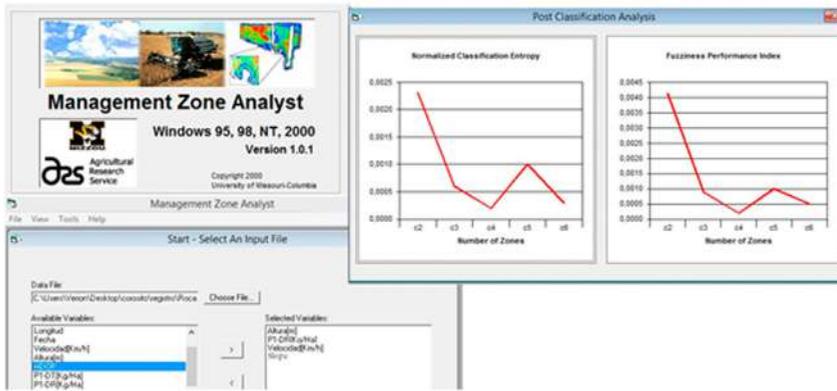


Figura 1. Representación gráfica del software empleado para este trabajo.

## Concepto de clúster de aplicación según tasa de avance

El análisis de clúster consiste en aglomerar individuos similares en distintos géneros. La literatura verificada muestra diferentes opciones algorítmicas para agrupar datos (Tou & Gonzalez, 1974; Hartigan, 1975), pero no existe una teoría ampliamente aceptada de agrupación (Milligan & Cheng, 1996).

Al verificar los datos recolectados encontramos el valor de la tasa de avance diario 52,4 ha/día reflejada por la ejecución de la labor en varias campañas. Al hallar los centroides correspondientes a cada lote se realiza un análisis de proximidad donde se encuentran las distancias medias entre centroides. Así se plantean las siguientes restricciones:

$$(Ec. 2) \quad S = \sum_{i=1}^n W_i C_i \prod_{j=1}^m r_j$$

Donde: S = conjunto de lotes para la aplicación;  $W_i$  = peso del criterio  $i$  ( $C_i$ );  $C_i$  = criterio de idoneidad;  $R_j$  = restricción.

$$(Ec. 3) \quad \prod_{j=1}^m r_j = \left\{ \begin{array}{l} \text{restricción en contiguidad de lotes, restricción} \\ \text{distancia medida} < \text{prom distancia de traslado} \\ \text{medida, restricción de tasa avance } 300 \text{ has} < \Sigma \\ \text{áreas} < 400 \text{ has} \end{array} \right\}$$

Con base en ello se establece lo que denominamos clúster de aplicación, que en síntesis es el conjunto

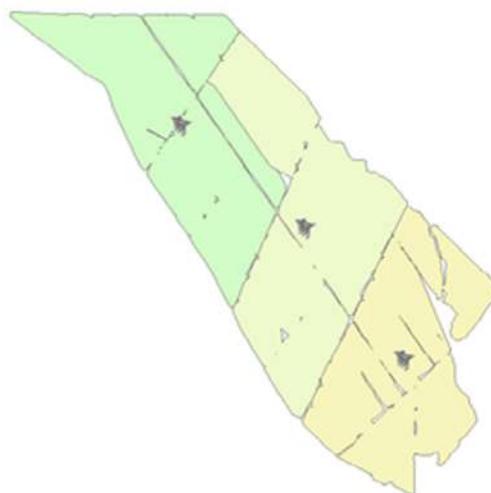
de lotes que se pueden aplicar durante un tiempo determinado, basado en la tasa de avance diario encontrada con los datos, el análisis de proximidad y las restricciones aplicadas.

Al tener delimitada esta nueva superficie definida por días de trabajo, que representa para el caso de estudio el 30 % del tiempo utilizado para ejecutar la labor de fertilización en una campaña, es posible conglomerar los lotes o parcelas que van a componer nuestra nueva unidad de trabajo. El siguiente paso es hallar las coordenadas correspondientes al centroide geométrico de esta superficie, que indica el nuevo eje de operaciones (Figura 2).

## Resultados

Como uno de los resultados se muestran las tablas de proximidad (Tablas 1, 2 y 3) calculadas a partir de los centroides hallados con los métodos previamente descritos, así como sus respectivas restricciones. Se adiciona una columna comparativa con el promedio de las distancias recorridas en traslados, reportadas en el sistema de adquisición de datos durante las campañas analizadas, verificando la disminución en la distancia recorrida planteada para cada lote. Cada clúster arroja un porcentaje de reducción, que es el resultado de minimizar las distancias recorridas para llegar a realizar la labor en cada uno de los lotes de aplicación. De esta manera, podemos ver claramente cómo al situarnos en los centros de gravedad de los clústeres mejoramos significativamente el desarrollo de la labor asignada.

**Figura 2.** Distribución de los centroides generales en una plantación de palma de aceite.



**Tabla 1.** Resultado comparación distancias recorridas SIG clúster 1.

Tabla de proximidad del clúster 1				Distancia recorrida medida
Rango cercano	(m)	Near Fid	Near Dist	$\bar{x}$ dist recor (mt)
1	272,2	16	272.198.907	278,21
2	378,9	4	378.884.058	568,77
3	414,0	6	413.960.309	1316,91
4	545,3	8	545.295.588	1319,05
5	574,4	12	574.356.177	1139,83
6	603,9	2	603.933.731	1327,43
7	645,9	19	645.861.529	1123,21
8	714,6	15	714.640.748	1137,54
9	725,4	14	725.448.415	2094,33
10	811,4	17	811.442.197	2250,53
11	873,0	13	872.980.708	1696,24
12	912,3	11	912.253.035	1312,80
13	919,3	1	919.287.369	1691,98
14	106,6	10	106.568.391	1316,91
15	1080,2	3	1.080.207.555	1123,21
16	1163,8	9	1.163.848.968	2782,09
17	1170,8	18	1.170.816.903	2250,53
18	1181,5	5	1.181.486.242	2094,33
19	1308,1	7	1.308.060.413	2438,13
20	1515,8	0	1.515.846.371	3794,69
$\bar{x}$ dist centroide	795,9		Page 1 of 1	
% reducción	0,4			

**Tabla 2.** Resultado comparación distancias recorridas SIG clúster 2.

Tabla de proximidad clúster 2				Distancia recorrida medida
Rango cercano	(mt)	Fid cercano	Distancia cercana	$\bar{x}$ dist recor (m)
1	258,4	15	258.367.921	752,26
2	319,9	14	319.874.071	566,79
3	339,2	12	338.210.624	941,85
4	393,2	16	393.162.296	2429,75
5	564,1	10	564.102.081	2444,24
6	604,1	17	604.105.123	1869,21
7	810,6	8	810.582.257	1685,87
8	816,7	18	816.702.935	752,26
9	940,5	13	940.529.931	2050,57
10	1045,0	6	1.045.048.995	1116,95
11	1065,0	2	1.064.952.318	3135,32
12	1121,1	11	1.121.051.882	1887,97
13	1262,8	4	1.262.814.831	2534,77
14	1268,0	0	1.267.971.808	1403,40
15	1319,2	9	1.526.185.895	1959,82
16	1409,9	3	1.409.853.308	1869,21
17	1526,2	7	1.526.185.895	1953,64
18	1697,8	1	1.697.780.056	2782,09
19	1733,4	5	1.733.415.431	2256,56
$\bar{x}$ dist centroide	973,4			
% reducción	0,4			

**Tabla 3.** Resultado comparación distancias recorridas SIG clúster 3.

Tabla de proximidad clúster 3				Distancia recorrida medida
Rango cercano	(m)	Fid cercano	Distancia cercana	$\bar{x}$ dist recor (m)
1	211,6	4	211.592.964	1691,98
2	315,3	3	315.252.781	568,77
3	333,6	5	333.626.709	568,77
4	520,3	6	520.264.263	556,42
5	521,1	2	521.141.964	568,77
6	630,5	13	630.529.292	675,17
7	701,0	14	701.038.788	1137,54

Continúa →

**Continuación Tabla 3.** Resultado comparación distancias recorridas SIG clúster 3.

Tabla de proximidad clúster 3				Distancia recorrida medida
Rango cercano	(m)	Fid cercano	Distancia cercana	$\bar{x}$ dist recor (m)
8	709,3	16	709.336.189	1137,54
9	844,9	7	844.946.631	1894,22
10	961,2	15	861.215.713	1137,54
11	889,1	12	889.110.458	1116,95
12	927,7	1	927.674.248	2782,09
13	974,4	11	974.404.565	1403,40
14	990,9	9	990.941.649	1119,01
15	1076,1	10	1.076.091.965	1953,64
16	1105,9	0	1.105.928.479	1959,82
17	1222,5	8	1.222.532.892	2819,45
$\bar{x}$ dist centroide	755,0			
% reducción	0,3			

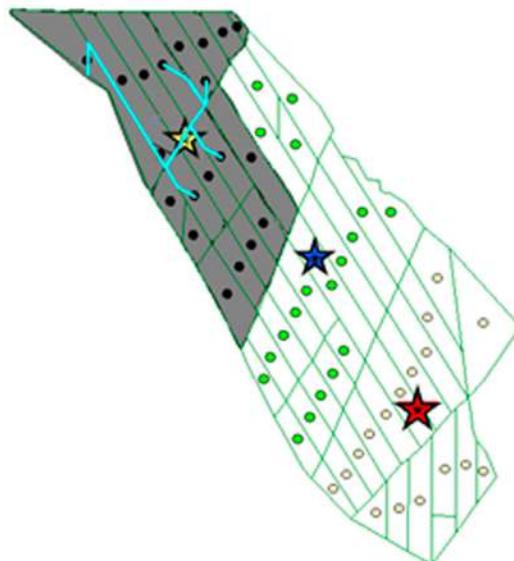
**Análisis de recorridos: ruta crítica**

Con los recorridos efectuados por el tractor podemos implementar una topología de red donde adjudicamos nodos a los cruces viales y a las entradas a cada lote. Asignando los valores de velocidad de recorrido, tiempos y distancias, además de otros parámetros como costos de trayecto y estado de la malla vial, encontramos rutas crí-

ticas para cada punto específico partiendo desde el centroide general del clúster definido hacia los respectivos de cada lote. Así logramos evaluar rutas, desplazamientos y otras acciones logísticas con anterioridad.

La Figura 3 muestra un análisis de recorrido con punto de inicio en el centroide del clúster 1 llegando a diferentes coordenadas específicas, parametrizado para recorrer la menor distancia posible.

**Figura 3.** Análisis de recorridos desde el centro de gravedad del clúster 1.



## Conclusión

Los datos recolectados mediante los sistemas de posicionamiento automatizado llevados de manera ordenada, rigurosa, verificando el adecuado almacenamiento y su constante actualización, permiten efectuar múltiples posibilidades de análisis. Estos nos proveen herramientas fundamentales para tomar decisiones fácticas sobre la metodología de trabajo en nuestro cultivo. Con base en los resultados del presente estudio, al reposicionar nuestro centro de operaciones en los centros de gravedad hallados y delimitados por las restricciones establecidas, dis-

minuyen los tiempos de traslado en un promedio de 35 % con respecto a los requeridos con la metodología de operación común. Al realizar una nueva configuración de operación, y gracias a la información recolectada, es posible hacer un análisis de ruta crítica, planteando así la forma más adecuada de realizar una faena de aplicación optimizando rutas y recorridos internos. Además, al contar con una base de datos de recorridos, tiempos, velocidades promedio, entre otras variables, se puede modelar el desarrollo de las actividades haciendo un planeamiento más riguroso y exacto en el desarrollo de la labor, buscando elevar los niveles de eficiencia en campo.

---

## Referencias bibliográficas

- ASAE EP496.3. (2009). Agricultural Machinery Management. St. Joseph: American Society of Agricultural and Biological Engineer.
- Bochtis, D. (2008). Minimising the non-working distance travelled by machines operating in a headland field pattern. *Biosystems Engineering*, 101(1), pp.1-12.
- Bochtis, D. (2009). Combine coverage and path planning for field operation. *Precision Agriculture*. In: E. J., van Henten, D., Goense, C., & Lokhorst (Eds.). *Proceedings of the 7th European Conference on Precision Agriculture*.
- Bochtis, D. (2010a). Machinery management in bio production systems: definitions and classifications of planning and scheduling aspects. *Agricultural Engineering International: research and development*, 12(2), 55-63.
- Bochtis, D. (2010b). The Vehicle routing problem in field logistics: part II. *Biosystems Engineering*, 105, 180-188.
- Bochtis, D., Sørensen, C., & Busato, P. (2014). Advances in agricultural machinery management: A review. *Biosystems engineering*, 126, 69-81.
- Derrett, B. B. (2006). *Ship Stability for Master and Mates*. Oxford: Elsevier Ltd.
- De Bruin, S. (2009). Spatial Optimisation of cropped swaths and field margins using GIS. *Computers and Electronics in Agriculture*, 68(2), 185-190.
- Esposito, G., Robledo, W., Bongiovanni, R., Ruffo, M. & Balboa, G. (2012). Dosificación variable de nitrógeno en maíz según el índice topográfico compuesto. En *Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo*. Mar del Plata, Argentina.
- Fridgen, N. E. (2003). Management Zone Analyst (MZA): *Software for Subfield Management Zone Delineation*. *Agronomy Journal*, 96(1), 25-32.
- Grisso, R. (2004). Field efficiency determination using traffic pattern indices. *Applied Engineering in Agriculture*, 20(5), 563-572.
- Hameed, I. (2013). Optimized driving direction based on a three dimensional field representation. *Computers and electronics in agriculture*, 91, 145-153.

- Hartigan, J. A. (1975). *Clustering Algorithms*. Hoboken: John Wiley & Sons.
- Hunt, D. (2001). *Farm Power and Machinery Management*. Ames, Iowa: Iowa State Press.
- Milligan, G. W., & Cheng, R. (1996). Measuring the influence of individual data points in a cluster analysis. *Journal of Classification*, 13(2), 315-335.
- Palmer, R. (2003). Improving the efficiency of field operations. *Biosystems Engineering*, 84(3), 283-288.
- Peart, R. (2004). *Agricultural Systems Management*. Boca Ratón: CRC Press.
- Sorensen, C. (2003). A model of field machinery capability and logistics: the case of manure. *Agricultural Engineering International Research and Development*. Manuscript PM 03 004. Vol. V.
- Spekken, M. (2013). Optimized routing on agricultural fields by minimizing maneuvering and servicing time. *Precision Agriculture*, 14(2), 224-244.
- Tou, J. T., & Gonzalez, R. C. (1974). *Pattern Recognition Principles*. Boston: Addison-Wesley Publishing Company.