

Metodología estratégica para levantamientos geológicos extensivos: caso de estudio en la Región Central de Panamá

Solís M., Yinela Y.

Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
yinela.solis@utp.ac.pa
0000-0003-4588-9061

Grajales-Saavedra, Francisco

Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
francisco.grajales@utp.ac.pa
0000-0003-1705-864x

Martínez, Ernesto

Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
ernesto.martinez@utp.ac.pa
0000-0002-6108-9841

Quintero A., Maynor N.

Consultor independiente
Panamá, Panamá
maynorquintero2016@outlook.com
0009-0001-3718-2851

Rodríguez, Rita D.

Universidad Tecnológica de Panamá
Panamá, Panamá
rita.rodriguez1@utp.ac.pa
0000-0003-4097-6502

Abstract

This study presents an adaptive methodology for the planning and execution of extensive geological surveys in the Central Region of Panama, developed within the framework of the project Petrographic Description of Central Panama. The proposed approach

integrates Geographic Information Systems (GIS), satellite-based photointerpretation, and territorial segmentation using Thiessen polygons to optimize site selection and improve spatial coverage in areas characterized by lithological heterogeneity and variable accessibility. Preliminary sampling points were identified through a bibliographic review, base cartography and satellite imagery analysis, which enabled the refinement of an initial network of potential outcrops. The territorial segmentation derived from Thiessen polygons facilitated logistical organization into seven balanced sampling zones. During 21 effective days of fieldwork, a total of 208 sites distributed across 27 districts were documented, and 229 rock samples were collected following a standardized protocol that included structural measurements, macroscopic lithological descriptions, and photographic documentation. The results demonstrate that GIS-based pre-field planning enhances operational efficiency and improves lithological representativeness, providing a viable alternative for surveys in regions with limited accessibility or outdated geological cartography. The methodology is reproducible, cost-effective, and applicable to academic, institutional, and research contexts, contributing to the development of future geological characterization initiatives in Panama.

Keywords: Geological mapping, photointerpretation, geological sampling, field planning, Thiessen polygons.

Resumen

Este estudio presenta una metodología adaptativa para la planificación y ejecución de levantamientos geológicos extensivos en la Región Central de Panamá, desarrollada en el marco del proyecto Descripción Petrográfica de la Región Central de Panamá. La propuesta integra herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), fotointerpretación satelital y segmentación territorial mediante polígonos de Thiessen con el objetivo de optimizar la selección de sitios de muestreo y mejorar la cobertura espacial en áreas con heterogeneidad litológica y variabilidad en accesibilidad. La identificación preliminar de puntos se realizó mediante revisión bibliográfica, cartografía base y análisis de imágenes satelitales, lo que permitió depurar una red inicial de afloramientos potenciales. La segmentación territorial derivada de los polígonos de Thiessen facilitó la organización logística en siete zonas de muestreo equilibradas. Durante 21 días efectivos de campaña se documentaron 208 sitios distribuidos en 27 distritos y se recolectaron 229 muestras de roca, siguiendo un protocolo estandarizado que incluyó registro estructural, descripción macroscópica y documentación fotográfica. Los resultados demuestran que la planificación previa basada en SIG mejora la eficiencia operativa y la representatividad litológica, constituyendo una alternativa viable para estudios en regiones con accesibilidad limitada o cartografía desactualizada. La metodología propuesta es reproducible, de bajo costo relativo y aplicable en contextos

académicos, institucionales y de investigación, contribuyendo al fortalecimiento de futuras iniciativas de caracterización geológica en Panamá.

Palabras claves: Cartografía geológica, fotointerpretación, muestreo geológico, planificación de campo, Polígonos de Thiessen.

1. INTRODUCCIÓN

El levantamiento geológico constituye una etapa fundamental para la caracterización litológica y estructural de un territorio, especialmente en regiones donde la diversidad litológica, la complejidad morfológica y la distribución irregular de afloramientos dificultan la obtención de datos representativos[1]. A nivel internacional los métodos como las mallas regulares o cuadrangulares han sido ampliamente utilizados por su simplicidad operativa. Sin embargo, múltiples autores han señalado sus limitaciones en zonas con accesibilidad variable, fuerte cobertura vegetal o ausencia de una red vial densa, factores que introducen sesgos espaciales y reducen la eficiencia del trabajo de campo[2].

En las últimas dos décadas, el uso de herramientas digitales y la integración de Sistemas de Información geográfica (SIG) han permitido el desarrollo de metodologías de planificación más precisas y adaptativas[3]. La fotointerpretación satelital, la segmentación espacial mediante algoritmos geométricos y la integración de rutas óptimas han mejorado la capacidad de seleccionar sitios con potencial geológico antes de las campañas de campo, optimizando tiempo, recursos y cobertura litológica[3]. No obstante, estos enfoques siguen siendo poco documentados en la literatura latinoamericana y son escasamente aplicados en estudios regionales.

En Panamá, la ejecución de levantamientos geológicos extensivos presenta desafíos particulares. La cartografía geológica disponible es limitada en resolución y, en muchos casos, carece de actualizaciones recientes[4]. Asimismo, no existen protocolos estandarizados, ni guías metodológicas ampliamente difundidas para la planificación de muestras a gran escala, lo que afecta la consistencia de los estudios académicos y profesionales. Esta ausencia metodológica limita la construcción de bases de datos modernas, la planificación territorial, la enseñanza universitaria y la valorización del patrimonio geológico del país.

Frente a este vacío, se vuelve necesario proponer un enfoque metodológico que permita la selección racional y eficiente de puntos de muestreo, incorporando criterios litológicos, accesibilidad en campo y segmentación espacial adaptativa. Los SIG, combinados con herramientas de observación remota como Google Earth y Google Maps, ofrecen una oportunidad para estructurar una planificación digital previa al muestreo, minimizando sesgos y permitiendo ampliar la cobertura geográfica en zonas extensas o de difícil acceso[1]. El presente estudio, desarrollado en el marco del proyecto descripción Petrográfica de la

Región Central de Panamá, propone una metodología integral para la planificación y ejecución de levantamientos geológicos extensivos. El objetivo es diseñar y evaluar un sistema de muestreo adaptativo basado en herramientas SIG, fotointerpretación y segmentación territorial mediante Polígonos de Thiessen, con el fin de optimizar la selección de sitios, maximizar la representatividad litológica y generar una base metodológica reproducible que pueda fortalecer futuras investigaciones geológicas, geotécnicas, ambientales y geoturísticas en Panamá.

2. MÉTODO

A. Selección preliminar de los puntos de muestreo

La identificación inicial de sitios potenciales se realizó mediante una revisión bibliográfica que recopiló antecedentes geológicos del área de estudio, unidades litológicas previamente descritas y afloramientos documentados en estudios académicos e institucionales[4]. A partir de esta información se estableció una primera propuesta de puntos distribuidos de manera irregular, en concordancia con la heterogeneidad litológica del área de estudio. Posteriormente, se complementó esta red preliminar con sitios identificados a través de marcadores geográficos y puntos turísticos registrados por usuarios en Google Maps, considerados útiles para inferir accesibilidad y la posible presencia de afloramientos. Cada punto se evaluó posteriormente mediante fotointerpretación en Google Earth, analizando patrones de exposición rocosa, rasgos geomorfológicos, texturas superficiales y características del relieve. Con base en esta evaluación se seleccionaron los puntos que presentaban afloramientos visibles, acceso viable mediante caminos principales o secundarios y relevancia litológica estimada. Se excluyeron aquellos ubicados en propiedades privadas sin permiso, en áreas con riesgos geológicos significativos, en zonas con afloramientos artificiales o en localidades repetitivas sin aporte litológico adicional. El resultado fue un conjunto depurado de puntos preliminares aptos para su incorporación en la planificación del levantamiento geológico.

B. Segmentación territorial mediante Polígonos de Thiessen

Una vez definida la red preliminar de puntos, el área de estudio se segmentó utilizando el método de Polígonos de Thiessen, que genera áreas de influencia equidistantes alrededor de cada punto. Esta técnica permitió dividir el territorio en zonas objetivas y continuas, evitando delimitaciones basadas en criterios subjetivos o de conveniencia operativa. El proceso dio como resultado siete zonas de muestreo de dimensiones equilibradas, cada una planificada para cubrirse en un periodo aproximado de tres días de trabajo en campo. Esta segmentación territorial facilitó la organización logística, redujo desplazamientos

innecesarios y permitió una cobertura, más homogénea en regiones con variaciones topográficas y diferencias en accesibilidad.

C. Planificación logística y mapas de apoyo

Con la segmentación territorial establecida, se generaron mapas temáticos utilizando la versión de ArcGIS Pro 3.4.3, integrando la cartografía geológica disponible, la red hidrográfica, las vías de acceso principales y secundarias, las curvas de nivel y el sombreado del terreno. Esta información permitió visualizar con precisión las características morfológicas del área y anticipar las condiciones de accesibilidad. Las rutas hacia los sitios de muestreo se planificaron digitalmente mediante Google Maps, priorizando trayectos seguros, continuos y eficientes dentro de cada zona. Todos los mapas y rutas se exportaron a dispositivos móviles y cuadernos de campo digitales, lo que facilitó su consulta durante las actividades en terreno y mejoró la capacidad de adaptación ante cambios en las condiciones del entorno[2], [5].

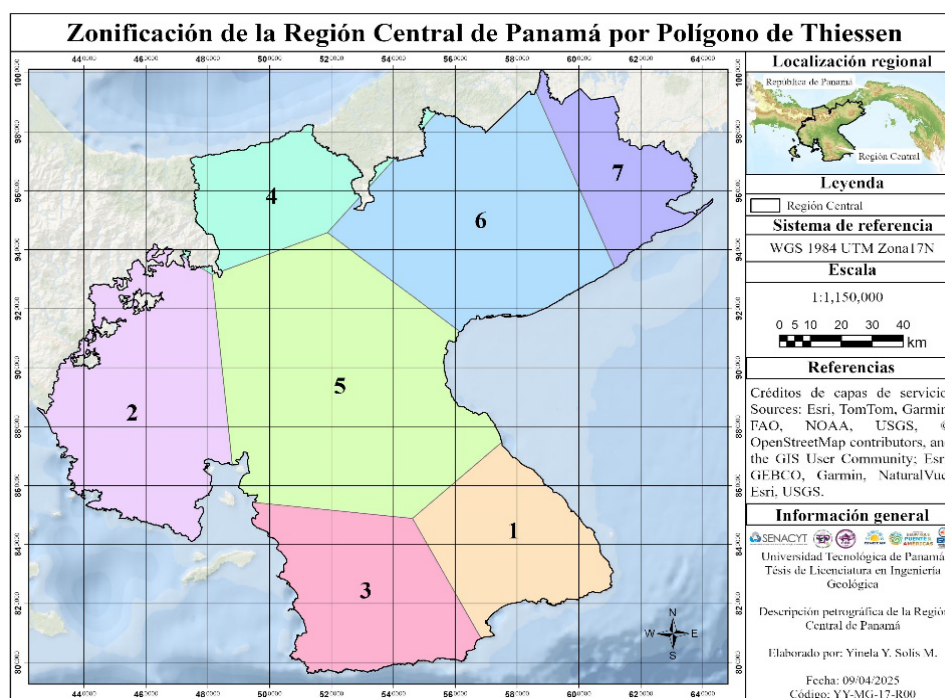


Figura 1. Ejemplo del formato cartográfico utilizado para la elaboración de los mapas temáticos y operativos empleados durante la planificación del levantamiento geológico. La figura ilustra el estilo de representación, simbología y elementos base (localización regional, escala, sistema de referencia y leyenda) incluidos en los mapas generados en ArcGIS Pro.

D. Protocolo de muestreo en campo

Las campañas se llevaron a cabo en estación seca, siguiendo un protocolo estandarizado en cada punto de muestreo. En cada sitio se registraron las coordenadas geográficas con una precisión inferior a 5m, se realizó documentación fotográfica del afloramiento y su entorno geomorfológico, y se efectuaron descripciones macroscópicas de las litologías, texturas y estructurales presentes. Asimismo, se registraron datos estructurales básicos como rumbo y buzamiento, junto con observaciones sobre la meteorización y la calidad de exposición. Cada muestra recolectada se identificó mediante un código único, almacenada adecuadamente y registrada en la libreta de campo. El equipo utilizado incluyó martillo geológico, brújula brunton, GPS, cinta métrica, bolsas resistentes, zunchos, cinta masking tape y cuadernos de campo, asegurando un procedimiento sistemático y reproducible.

E. Flujo metodológico general

El Proceso metodológico siguió una secuencia estructurada que comenzó con la revisión bibliográfica y cartográfica, continuó con la selección preliminar de punto mediante fotointerpretación, y avanza hacia la segmentación territorial mediante polígonos de Thiessen para delimitar zonas de muestreo. Posteriormente, se desarrolló la planificación logística mediante mapas temáticos y rutas optimizadas, para finalmente ejecutar el trabajo de campo siguiendo un protocolo estandarizado de documentación y recolección de muestras. Esta secuencia permitió integrar eficazmente análisis digitales y trabajo de campo adaptativo, garantizando una cobertura eficiente y representativa del área de estudio.

3. RESULTADOS

El levantamiento geológico realizado en la Región Central de Panamá permitió documentar un total de 208 sitios de muestreo distribuidos en 27 de los 36 distritos que conforman el área de estudio. La cobertura espacial abarcó zonas con variada accesibilidad, desde áreas cercanas a vías principales hasta sectores rurales con redes viales secundarias. La aplicación del esquema de segmentación territorial generó siete zonas operativas, lo que facilitó una distribución equilibrada del esfuerzo de muestreo. Las zonas de mayor densidad de puntos coincidieron con áreas donde las condiciones topográficas, la exposición de roca y la accesibilidad favorecieron la identificación de afloramientos. El uso continuo de herramientas SIG permitió mantener un registro preciso de la localización de cada sitio, con exactitud inferior 5 m en las coordenadas capturadas durante las campañas.

Las campañas se desarrollan durante 21 días efectivos, con un promedio de diez puntos de muestreo por día. Esta tasa de productividad se mantuvo relativamente constante en las siete zonas planificadas, pese a la variabilidad en las condiciones de accesibilidad y exposición. En cada sitio se completó el protocolo de registro fotográfico, descripción macroscópica y

levantamiento estructural básico. La logística preestablecida permitió minimizar tiempos de desplazamiento y maximizar la permanencia en los sitios de muestreo, lo que contribuyó al cumplimiento del itinerario previsto para cada zona. La planificación previa de rutas y la disponibilidad de mapas temáticos facilitaron la adaptación del recorrido diario ante cambios e el clima, condiciones del terreno o restricciones de acceso inesperadas.

En total se recolectaron 229 muestras de roca representativas de las principales unidades litológicas en el área de estudio. Las muestras incluyeron litologías ígneas, sedimentarias, volcanosedimentarias y metamórficas distribuidas de forma heterogénea en el territorio. En algunos sectores, especialmente en áreas de topografía más abrupta, la exposición rocosa permitió la descripción de estructuras mesoscópicas, mientras que en zonas de baja exposición se optó por el registro de rasgos macroscópicos y la toma de muestras de mano. La calidad de las exposiciones varió entre sitios, pero el protocolo permitió obtener descripciones confiables incluso en afloramientos parcialmente cubiertos por vegetación o depósitos superficiales.

Se recorrieron 208 sitios de muestreo que se documentaron mediante registro fotográfico orientado a capturar tanto el afloramiento como su entorno geomorfológico inmediato. Además, se obtuvieron datos estructurales básicos, entre ellos medidas de rumbo y buzamiento cuando la morfología del afloramiento lo permitía. Esta información complementaria permitió generar un archivo descriptivo consistente para cada localización, listo para su integración posterior con los análisis petrográficos y las representaciones cartográficas del proyecto.

La planificación digital previa se reflejó en la congruencia entre los puntos preliminares seleccionados mediante fotointerpretación y los sitios que finalmente pudieron visitarse y muestrearse. El 87% de los puntos preseleccionados se validaron como afloramientos aptos durante el trabajo de campo, mientras que el resto fue descartado por condiciones de accesibilidad y restricciones de propiedad. La concordancia entre la planificación SIG y la ejecución en terreno permitió mantener una cobertura equilibrada en zonas con variabilidad litológica y topográfica.

4. CONCLUSIONES

La aplicación de una metodología adaptativa para el levantamiento geológico extensivo en la Región Central de Panamá permitió establecer un procedimiento reproducible y eficiente para la planificación y ejecución de campañas de muestreo. La integración de herramientas SIG, fotointerpretación satelital y segmentación territorial mediante polígonos de Thiessen constituyó un enfoque coherente para optimizar la selección de sitios y mejorar la cobertura espacial en áreas como heterogeneidad litológica y variabilidad en accesibilidad.

El protocolo aplicado en campo demostró ser operativo en regiones extensas y diversas, al

permitir una documentación sistemática de los afloramientos y la recolección de muestras representativas en un periodo de tiempo reducido. La coherencia entre la planificación digital y la validación en campo mostró que las técnicas empleadas son replicables, de bajo costo relativo y adecuadas para proyectos académicos y profesionales.

Los resultados obtenidos evidencian el potencial de este enfoque para fortalecer futuras iniciativas de investigación geológica y para contribuir al desarrollo de lineamientos metodológicos aplicables en Panamá. Se recomienda su incorporación en procesos de formación universitaria, en la actualización de protocolos institucionales y en la planificación de estudios geocientíficos orientados a la caracterización litológica, el ordenamiento territorial y el desarrollo del geoturismo.

Referencias

- [1] K. J. W. McCaffrey et al., “Unlocking the spatial dimension: Digital technologies and the future of geoscience fieldwork,” *J Geol Soc London*, vol. 162, no. 6, pp. 927–938, Nov. 2005, doi: 10.1144/0016-764905-017.
- [2] M. del P. Villalta Echeverría and A. G. Viña Ortega, “Diseño de una metodología de análisis de recursos digitales para planificación de actividades de levantamiento geológico,” 2020, Accessed: Jul. 02, 2025. [Online]. Available: <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/50432>
- [3] J. C. Otto, G. Prasicek, J. Blöthe, and L. Schrott, “GIS Applications in Geomorphology,” *Comprehensive Geographic Information Systems*, vol. 3, pp. 81–111, Jul. 2017, doi: 10.1016/B978-0-12-409548-9.10029-6.
- [4] Y. Y. S. M., R. D. Rodríguez, E. Gutierréz, F. Grajales-Saavedra, and E. Martínez, “Historia de los estudios petrográficos de la Región Central de Panamá: una revisión literaria,” *Revista de Iniciación Científica*, vol. 11, no. 1, pp. 75–81, Jan. 2025, doi: 10.33412/REV-RIC.V11.1.4127.
- [5] S. J. Whitmeyer, E. J. Pyle, T. L. Pavlis, W. Swanger, and L. Roberts, “Modern approaches to field data collection and mapping: Digital methods, crowdsourcing, and the future of statistical analyses,” *J Struct Geol*, vol. 125, pp. 29–40, Aug. 2019, doi: 10.1016/J.JSG.2018.06.023.

Autorización y Licencia CC

Los autores autorizan a APANAC XVIII a publicar el artículo en las actas de la conferencia en Acceso Abierto (Open Access) en diversos formatos digitales (PDF, HTML, EPUB) e integrarlos en diversas plataformas online como repositorios y bases de datos bajo la licencia CC:

Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>.

Ni APANAC XVIII ni los editores son responsables ni del contenido ni de las implicaciones de lo expresado en el artículo.