

RESEARCH ARTICLE

Mapping of the Kalahari basin in southern Angola using airborne geophysics and remote sensing methods

Cartografía de la cuenca del Kalahari en el sur de Angola mediante métodos radiométricos y teledetección

 Raquel Martín-Banda^{1*},  María Teresa López-Bahut²,  Juan Carlos Gumiel²,  Carmen Rey-Moral²,
 María del Carmen Fera³,  Enrique Merino-Martínez²,  José Luis García-Lobón²,
 Américo da Mata Lourenço Victorino⁴

¹Instituto Geológico y Minero de España, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IGME-CSIC), Plaza de España-Torre Norte, 41013 Sevilla, España.

²Instituto Geológico y Minero de España, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IGME-CSIC), C/ La Calera, 1, 28760 Tres Cantos – Madrid, España.

³SATEC –Sistemas Avanzados de Tecnología S.A., Av. de Europa, 34, A, 28023 Madrid, España.

⁴Instituto Geológico de Angola (IGEO), Rua 311, Centralidade do Kilamba, Luanda, Angola.

Corresponding author: r.martin@igme.es (Raquel Martín Banda)

Key point:

Gamma radiation spectrometry as a basic tool for geological mapping of remote areas.

Directed Principal Component Analysis algorithm for the identification of the surface formations.

Geological mapping of large intracratonic continental basins and identification of inactive deltaic megafans in Africa.

ABSTRACT

The National Geological Plan of Angola (PLANAGEO) has involved an important cartographic challenge: to recognise and sample a vast territory that is difficult to access in limited time, with the possibility of intercepting anti-personnel and anti-tank mines scattered in the field, among other risks. These vicissitudes become more significant the more remote the region is, as in the Owambo basin, located in the southern Angola. The also named Cuvelai-Etoshá basin is one of the main depocenters of the Kalahari Basin, filled by the Cenozoic sediments of three major fluvial-deltaic systems: Cunene, Cubango and Cuvelai. The inactivity of the first two systems, the lack of outcrops and poor lateral continuity of facies have made lithostratigraphic definition and geological mapping even more difficult. During the first phases of the project, the regolith map was made, based on the methodology of CRC LEME (Cooperative Research Centre for Landscape Environment and Mineral Exploration). The use of band rationing and Directed Principal Component Analysis to process the multispectral Landsat 8 imagery proposed by this methodology, in combination with radiometric images acquired from the regional aerogeophysical survey conducted in PLANAGEO, proved to be an essential technique for the mapping of the large deltaic systems of the Owambo basin and the differentiation of geological units within these systems.

Keywords: Kalahari; Remote sensing; Radiometric; Airborne geophysics; Geological mapping.

Article History:

Received: 22/03/2024

Accepted: 05/03/2025

Published: 22/08/2025

Puntos clave:

Espectrometría de radiación gamma como herramienta básica de la cartografía geológica de áreas remotas.

Algoritmo de Análisis de Componentes Principales Dirigidos para la identificación de formaciones superficiales.

Cartografía geológica de grandes cuencas continentales intracratónicas e identificación de

RESUMEN

El Plan Geológico Nacional de Angola (PLANAGEO) ha supuesto un importante reto cartográfico: reconocer y muestrear un vasto territorio de difícil acceso en un tiempo limitado, con la posibilidad de interceptar minas antipersona y antitanque diseminadas por el territorio, entre otros riesgos. Estas vicisitudes se hacen más significativas cuanto más remota es la región, como es el caso de la cuenca de Owambo, situada en el sur de Angola. Esta cuenca, también llamada Cuvelai-Etoshá, es uno de los principales depocentros de la cuenca del Kalahari rellena por los sedimentos cenozoicos de tres grandes sistemas fluvio-deltaicos: Cunene, Cubango y Cuvelai. La inactividad de los dos primeros sistemas, la falta de afloramientos y la escasa continuidad lateral de las facies han dificultado aún más la definición litoestratigráfica y la cartografía geológica. Durante las primeras fases del proyecto, se realizó el mapa del regolito, basado en la metodología del CRC LEME (Cooperative Research Centre for Landscape Environment and Mineral Exploration). El uso de cocientes de bandas y del algoritmo de Análisis de Componentes Principales Dirigidos para procesar las imágenes multiespectrales Landsat 8 propuestos por esta metodología, en combinación con las imágenes radiométricas adquiridas a partir de la campaña aerogeofísica regional realizada en PLANAGEO, demostró ser una técnica

abanicos deltaicos
inactivos en África.

esencial para la cartografía de los grandes sistemas deltaicos de la cuenca de Owambo y la diferenciación de las unidades geológicas dentro de estos sistemas.

Palabras clave: Kalahari; Teledetección; Radiometría; Geofísica aeroportada; Cartografía geológica.

Historial del artículo:

Recibido: 22/03/2024

Aceptado: 05/03/2025

Publicado: 22/08/2025

Citation / Cómo citar este artículo: Martín-Banda, R., López-Bahut, M.T., Gumiel, J.C., Rey-Moral, C., Fera, M.C., Merino-Martínez, E., García-Lobón, J.L., Victorino, A.M.L. (2025). Mapping of the Kalahari basin in southern Angola using airborne geophysics and remote sensing methods. *Boletín Geológico y Minero*, 136(1), 005. <https://doi.org/10.21701/bolgeomin/136.1/005>

1. Introducción

El mapa geológico es un elemento clave en cualquier programa de exploración de recursos naturales (p.e., Brimhall *et al.*, 2006). En regiones desérticas o de difícil acceso, la realización de trabajos de campo para la obtención de una cartografía geológica puede ser una tarea ardua e incluso imposible. Es por ello que durante los últimos 50 años ha tenido lugar un importante desarrollo de técnicas subsidiarias como, por ejemplo, la teledetección, que ha revolucionado la forma de hacer cartografía geológica (p.e., Omali, 2021). Distintas misiones de observación de la Tierra, con sensores de resolución espacial y espectral variables, se han ido siguiendo en el tiempo (Landsat 1 a Landsat 9, ASTER y otros satélites multi- e hiperespectrales), capturando de manera continuada imágenes basadas en la radiación electromagnética que emite o refleja la superficie terrestre. La capacidad de obtener datos multi- e hiperespectrales tanto desde sistemas espaciales como aéreos, junto con la combinación de imágenes y tecnologías de procesamiento avanzadas, posibilita el análisis de la composición mineralógica de las rocas y la identificación de formaciones geológicas en grandes áreas, así como la identificación de estructuras esenciales para comprender la historia geológica de una región (p.e., Van der Meer *et al.*, 2012).

En este sentido, el Plan Nacional de Geología de Angola (PLANAGEO) ha supuesto un importante reto cartográfico: reconocer y muestrear un vasto territorio con escasas infraestructuras que, entre otros riesgos, cuenta con la presencia de minas antipersona y antitanque dispersas por el campo. Todas estas vicisitudes se tornan aún más significativas cuánto más remota es la región, como es el caso de la zona de estudio, localizada en la parte más meridional de Angola, concretamente en la mitad norte de uno de los principales depocentros de la Cuenca del Kalahari: la Cuenca de Owambo. Esta región se caracteriza por el hecho de que carece prácticamente de estudios cartográficos. Tan sólo destacan los trabajos de Wilkinson *et al.* (2008, 2023) que definen la existencia de mega abanicos fluviales a pie de los relieves angoleños, en base al análisis geomorfológico del modelo digital de elevaciones (MDE) realizado con los datos radar SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) de la NASA, a las imágenes de satélite (Google Earth y Landsat 4-5) y al mapa de rugosidades construido a partir del algoritmo de rugosidad, desarrollado por Kreslavsky & Head (1999, 2002) para la superficie de Marte.

El proyecto PLANAGEO, promovido por el gobierno angoleño con el objetivo principal de realizar un levantamiento aerogeofísico y geológico sistemático del país, ofrecía la oportunidad de combinar la teledetección con datos geofísicos aéreos y, por tanto, continuos, de buena calidad. Uno de los productos cartográficos que se llevaron a cabo durante las primeras fases de proyecto fue el mapa de regolito, que se realizó siguiendo una adaptación de la metodología del CRC LEME descrita en Papp (2002), a partir del análisis del MDE, las imágenes satelitales multiespectrales y los datos radiométricos aeroportados (K-U-Th). El uso de cocientes de bandas y del algoritmo de Análisis de Componentes Principales Dirigido (DPCA, *Directed Principal Component Analysis*) (Fraser & Green, 1987) para procesar las escenas Landsat 8 en combinación con las imágenes radiométricas (K-U-Th), que propone esta metodología, resultó una técnica esencial para la realización de la cartografía de los grandes sistemas deltaicos de la cuenca de Owambo y la diferenciación de unidades geológicas dentro de estos sistemas deposicionales. En este trabajo, presentamos los resultados de la aplicación de esta metodología para la realización de la cartografía geológica a escala 1:250000 de la Cuenca de Owambo en Angola y discutimos los resultados con el estado actual de conocimiento de la cuenca.

2. Encuadre geológico

La Cuenca del Kalahari es la mayor cuenca intracratónica del mundo. Más desarrollada en dirección N-S, tiene una longitud de 2250 km entre Sudáfrica y Gabón, cubriendo una superficie de 2,7 millones de km² (Fig. 1A). En Angola, la franja meridional y toda la mitad este del país está cubierta por sedimentos continentales depositados en esta cuenca intracratónica tectónicamente activa, formada en respuesta al levantamiento por flexión isostática del margen continental africano (De Wit, 2007). Comenzó a formarse, junto con la Cuenca del Congo, en el Cretácico Inferior con la ruptura del continente Gondwana, en el primer arqueamiento de la superficie formada en el interior del continente africano.

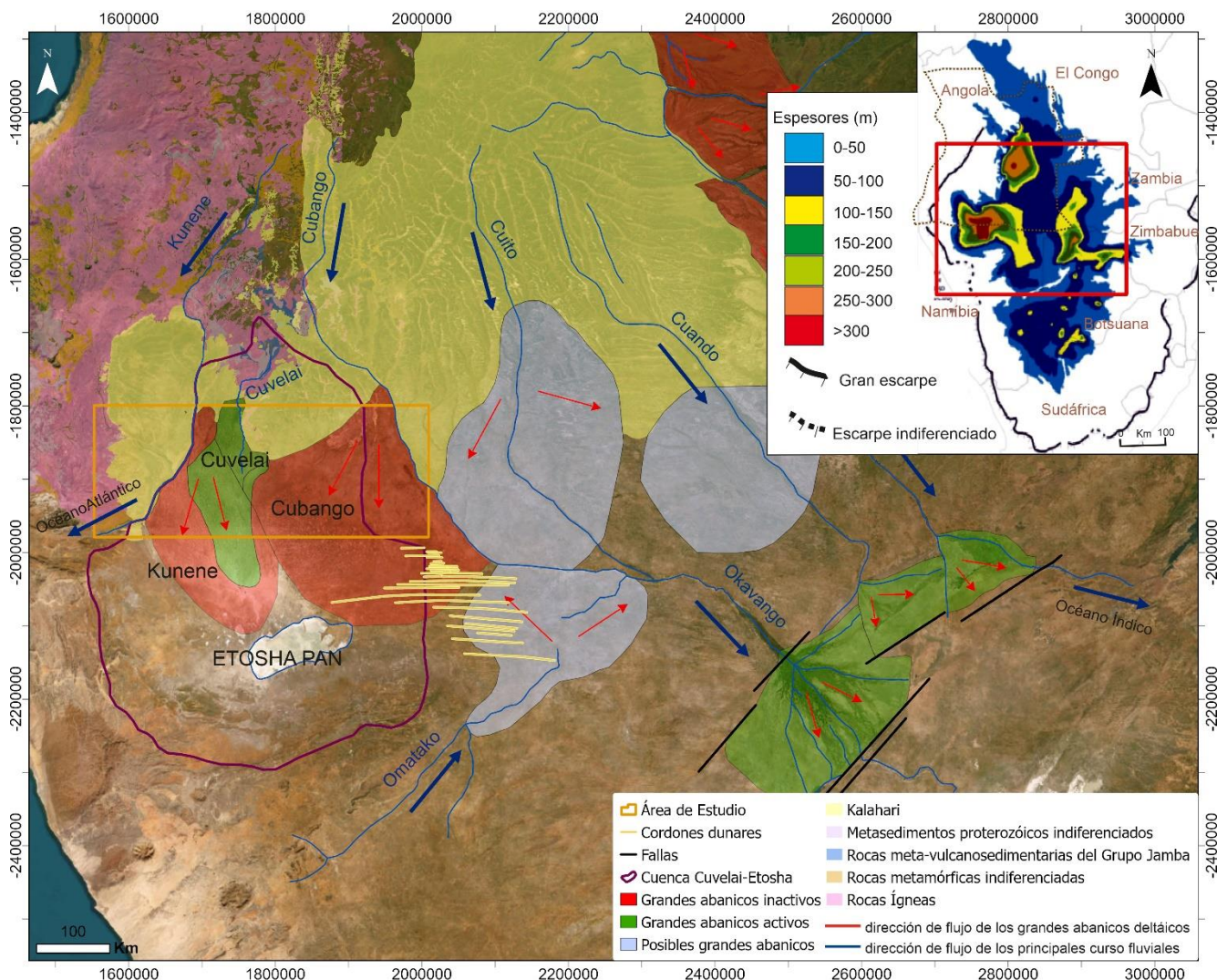


Figura 1. A) Extensión y depocentros de la cuenca del Kalahari según Haddon (2005) y localización de la Figura 1B (recuadro rojo). B) Encuadre geológico de la cuenca de Owambo o Cuvelai-Etoshia (línea rosa) y zona de estudio (recuadro de color naranja) en el contexto de los grandes abanicos identificados por Wilkinson *et al.* (2023) en el norte de la cuenca del Kalahari. Las flechas azules indican la dirección de flujo de los principales cursos fluviales y las flechas rojas indican las direcciones de flujo de los grandes abanicos deltaicos.

Figure 1. A) Extent and depocenters of the Kalahari Basin according to Haddon (2005) and location of Figure 1B (red box). B) Geological setting of the Owambo Basin (red line) and study area (yellow box) in the context of the large fans identified by Wilkinson *et al.* (2023) in the northern Kalahari Basin. The blue arrows indicate the flow direction of the main river courses and the red arrows indicate the flow direction of the large deltaic fans.

La sucesión litoestratigráfica dentro de la cuenca es difícil de establecer por la falta de buenos afloramientos, escasa continuidad lateral de las facies y por la dificultad para definir marcadores dentro de la secuencia sedimentaria, a lo que se le suma el poco interés que han despertado estos sedimentos

arenosos estériles. Aun así, el Grupo del Kalahari ha sido estudiado en diversos sectores de esta inmensa cuenca intracratónica. Destacan los primeros estudios que fueron esencialmente estratigráficos (p.e., Passarge, 1904; Polinard, 1947; Du Toit, 1927; Cahen & Lepersonne, 1952, 1954; Money, 1972; SACS, 1980) y publicaciones recientes que resumen la litoestratigrafía formal del Grupo Kalahari en varios sectores de la cuenca (p.e., Haddon, 2005; Haddon & McCarthy, 2005; Roberts et al., 2015; Linol et al., 2015), definiendo dos subgrupos: i) Subgrupo del Kalahari inferior o Formación Gres Polimorfos, formado por areniscas fosilíferas silicificadas con niveles conglomeráticos y limolíticos subordinados del Oligoceno-Mioceno (Grecoff, 1958; Colin, 1994); y ii) Subgrupo Kalahari superior o Formación Arenas Ocreas, formado por arenas no consolidadas del Mioceno-Plioceno (Lepersonne, 1945; Cahen et al., 1946; De Ploey et al., 1968).

El mayor espesor de sedimentos se encuentra a lo largo del margen occidental de la plataforma del Kalahari, superpuesta o heredada de la Superficie Africana (Linol, 2013). En el Paleógeno, esta superficie soportó un episodio de levantamiento en la meseta central angoleña, debido a la evolución del sistema del Rift de África Oriental (Chorowicz, 2005; Pik et al., 2008), registrándose los siguientes depocentros de norte a sur (p.e., Haddon, 2005; Fig. 1A): en el centro de Angola en la región de Camacupa (250 m), en el sector norte de Botsuana (200 m) y en la cuenca de Owambo (350 m), zona de estudio que nos ocupa.

La cuenca de Owambo es una cuenca endorreica y transfronteriza, que cubre parte del sur de Angola y del noroeste de Namibia, también conocida como Cuvelai-Etosha. Actualmente está alimentada por el pequeño sistema estacional del río Cuvelai, que drena sus aguas desde la meseta angoleña de Bié hacia la gran llanura seca del Etosha en Namibia (Fig. 1B).

El relleno de la cuenca, en Angola, está formado esencialmente por sedimentos detríticos cenozoicos, depositados por grandes sistemas fluvio-deltaicos que drenaban hacia la depresión del Etosha, dispuestos sobre el flanco inferior de la meseta de Bié (Miller et al., 2010), un basamento plutono-metamórfico de edad Arcaico a Paleoproterozoico (Jelsma et al., 2018). La existencia de estos mega abanicos fluviales a pie de los relieves angoleños fue puesto de manifiesto por Wilkinson et al. (2008) a partir del análisis geomorfológico del borde norte de la Cuenca de Kalahari mediante técnicas de teledetección. Hasta ese momento, los trabajos geológicos realizados en esta región también conocida como Cuanhama-Etosha eran de la época pre-independencia, centrados en aspectos geomorfológicos (p.e., Feio, 1966) y mal conservados. Así, toda esta vasta extensión esencialmente plana y arenosa, situada entre los ríos Cunene (o Kunene) y Cubango (o Okavango en Botsuana), estaba considerada, desde el punto de vista cartográfico, como una única unidad de edad cuaternario indiferenciado, llamada Kalahari removilizado (Carvalho, 1982; Araújo & Guimarães, 1998). Esta superficie fundamentalmente llana, a veces, presenta un paisaje ligeramente ondulado, alternando zonas de *chanas* o *ecangos* de fondo arcilloso y escasa vegetación, con zonas arenosas de *mufitos*, algo más elevadas, pobladas de vegetación arbustiva y arbórea baja. Las *chanas* y *ecangos* se inundan estacionalmente, dando lugar en muchos casos a pequeños cursos de agua entre los ríos Cunene y Cubango, independientes de estos y pertenecientes a la cuenca del río Cuvelai, que desaguan en el Etosha los años de crecida.

Los ríos Cunene y Cubango fueron los ríos formadores de los grandes sistemas deltaicos, actualmente inactivos, que rellenaban la cuenca y alimentaban el paleolago Etosha, un lago con lámina de agua permanente y una extensión mayor de lo que hoy dibuja la gran planicie blanca del Etosha (Miller, 2008; Wilkinson et al., 2008; Miller et al., 2010). Actualmente, ambos ríos drenan fuertemente encajados fuera de la cuenca de Owambo: el primero fluye hacia el suroeste en un gran valle, capturado en la región de Ruacanán (cataratas de Ruacanán) en la frontera con Namibia por la red atlántica, y el segundo, lo hace hacia el sureste, por un estrecho valle de 60 m de profundidad, desembocando en el conocido Delta del Okavango en Botsuana. El abandono de estos ríos y la inactividad de estos sistemas fluvio-deltaicos, permitió al sistema fluvial del Cuvelai, más pequeño que los anteriores, formar un sistema deltaico entre ambos, actualmente activo (Miller et al., 2010; Lindenmaier et al., 2014; Wilkinson et al., 2023). Estos paleosistemas y sus cuencas de drenaje actual se asocian, por tanto, a los dos últimos ciclos de erosión-sedimentación (Cuanhama I y II) que ya definió Feio (1966) en el sector angoleño de la cuenca.

Miller (1997), a partir de los sondeos realizados en la década de los 60 para la exploración de carbón en la parte namibia de la cuenca, define las formaciones que conforman el Grupo Kalahari en la cuenca de Owambo, que de base a techo son: Formación Ombalantu roja basal de grano fino (Cretácico?), Formación Beiseb dominada por conglomerados, y la Formación Olukonda y, a techo, la Formación Andoni, formadas por los sedimentos de varios sistemas deltaicos apilados. La atención que ha recibido esta región en los últimos años desde el punto de vista hidrogeológico por las graves sequías plurianuales y recurrentes que experimenta (Dill *et al.*, 2013; Lindenmaier *et al.*, 2014; Wallner *et al.*, 2017), ha permitido conocer mejor la evolución paleogeográfica y paleoclimática cenozoica de la cuenca de Owambo (Houben *et al.*, 2020) y el origen de sus sedimentos (Gärtner *et al.*, 2023). Sin embargo, las litologías tan variables, las diferentes regiones de procedencia y la escasez de fósiles de diagnóstico (Thomas & Shaw, 1990; Haddon & McCarthy, 2005; Miller, 2008; Lindenmaier *et al.*, 2014; Matmon *et al.*, 2015) dificultan las correlaciones estratigráficas regionales en toda la gran cuenca del Kalahari.

3. Metodología

La metodología empleada en este trabajo es una adaptación de la desarrollada por el centro de investigación australiano CRC LEME (*Cooperative Research Centre for Landscape Environments and Mineral Exploration*) para la exploración del regolito (Papp, 2002). Los mapas de regolito contienen unidades de regolito residual o *in situ* y unidades de regolito transportado. Estas últimas representan las formaciones superficiales originadas a partir del transporte y sedimentación del material procedente de la meteorización y alteración de las rocas, presentando una relación directa con las unidades cuaternarias del mapa geológico o las formaciones superficiales del mapa geomorfológico (depósitos de origen eólico, fluvial, gravitacional, etc.). De esta manera, para la identificación y cartografía de los grandes sistemas deltaicos en superficie y de las distintas unidades geológicas más recientes de la Cuenca de Owambo hemos empleado las técnicas que según esta metodología australiana discriminan las formaciones superficiales de forma más eficiente.

3.1. Radiometría

La espectrometría de radiación gamma es una herramienta ampliamente utilizada en la cartografía geológica, estudios de regolito, exploración mineral y otros, siendo su uso de especial relevancia en áreas remotas. Los rayos gamma penetran hasta 30 cm bajo la superficie y varios centenares de metros en el aire, por lo que son fácilmente detectables con métodos aeroportados (Minty, 1997; IAEA, 2003). Los isótopos radiactivos utilizados mayoritariamente en las investigaciones radiométricas son potasio (^{40}K), torio (^{232}Th) y uranio (^{235}U , ^{238}U), por ser los que tienen suficiente energía para poder ser detectados en investigaciones convencionales. La amplitud en la variación de los límites naturales de estos tres isótopos implica que no existe una relación directa entre la proporción de radioisótopos y un tipo litológico concreto, sin embargo, se revela como una herramienta fundamental por su correlación directa con la geología superficial, siendo especialmente útil en el estudio de complejos plutónicos, directamente relacionados con la exploración de minerales. No obstante, tienen otras aplicaciones como es el estudio de riesgo de radón, exploración petrolífera, producción radiogénica de calor y la cartografía en zonas de sedimentos recientes (Milligan & Gunn, 1997) como es el caso del desierto del Kalahari. Las principales aportaciones de la radiometría se pueden resumir en:

- Relacionar las anomalías radiométricas con litologías ya cartografiadas. Se pueden establecer patrones de anomalías en una zona concreta.
- El contenido en K y Th de los sedimentos superficiales, reflejan el contenido en estos elementos de la roca madre. Esto es más difícil de determinar con el U, al tratarse de un elemento muy volátil, por lo que es menos apropiado para usar en cartografía.
- La presencia de fluidos puede cambiar el estado de oxidación de la roca y puede transportar elementos, con el consiguiente cambio en las proporciones de U, Th y K.

La concentración de los elementos puede mostrarse mediante mapas independientes de cada elemento radiactivo (K-Th-U) o a través de la combinación de los tres elementos. Esta forma de representación se denomina mapa ternario que representa la mezcla de tres colores puros atribuidos a cada elemento, lo que aporta la proporción relativa de cada elemento en un afloramiento dado. Utilizando la paleta de color CMY (Cian-Magenta-Yellow) las áreas en blanco corresponderían con zonas de bajas emisiones radiactivas, típicas de las rocas básicas y carbonatos, mientras que áreas en negro serían zonas de elevadas emisiones con saturación en los tres elementos radioactivos, típicos de rocas ácidas intrusivas y volcánicas ácidas. Las áreas enriquecidas en cada elemento estarían representadas por colores puros cian, magenta o yellow.

En la zona de estudio se han volado un total de 79.676 km lineales, según una dirección N-S de líneas de vuelo, con separación de 1 km y altura nominal de 100 m. Adicionalmente, se volaron líneas de dirección E-O, con una separación de 10 km, que actúan como líneas de control en los puntos de intersección con las líneas N-S. La toma de datos aerogeofísicos se llevó a cabo entre febrero y mayo de 2015 a cargo de la empresa Xcalibur Multiphysics Ltd. (<https://www.xcaliburmp.com/es/xcalibur-multiphysics/>), para lo que dispuso de varios aviones (entre dos y cuatro) modelo AIR TRACTOR AT-502B, que estuvieron operativos a lo largo de toda la campaña de adquisición. Se utilizó el espectrómetro de última generación RS-500, con dos sensores RSX-5. El control de calidad aplicado a los datos radiométricos se dividía en calibración pre-campaña (test sensibilidad, determinación del fondo natural, determinación del coeficiente de atenuación por altura y determinación de coeficiente para el efecto de radiación cósmica) y calibraciones durante el vuelo (inventario de datos, intervalo de muestreo, separación entre líneas de vuelo, control de la diferencia de altura entre los puntos de intersección entre las líneas de vuelo y las líneas transversales). Finalmente, y según las especificaciones del contrato, todos los datos se encuentran dentro de la tolerancia requerida (Tabla 1).

TOLERANCIA	LÍMITE
1. Desvío máximo de altura de vuelo para una distancia especificada	±20 m/2000 m
2. Desvío máximo de trayectoria de vuelo para una distancia especificada	150 m/2000 m
3. Separación máxima entre líneas de vuelo principales para una distancia especificada	250 m/2000 m
4. Diferencia de altura entre líneas de vuelo y el punto de intersección con las líneas transversales	≤10 m
5. Error de posicionamiento según mediciones diarias en tres puntos de coordenadas conocidas	≤10 m

Tabla 1. Tolerancia de las calibraciones realizada durante el vuelo.

Table 1. In-flight calibration tolerances.

3.2. Teledetección

El empleo de imágenes de satélite aporta una visión sinóptica del territorio y supone una herramienta fundamental para la cartografía geológica y el análisis del relieve. En este trabajo se utilizaron imágenes adquiridas por el sensor multispectral OLI (*Operational Land Imager*) de la misión Landsat 8 (<https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8>), así como el modelo digital de elevaciones ASTER Global DEM Version2 (<https://lpdaac.usgs.gov/products/astgtmv002>) obtenido a partir de los datos de la misión ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) y disponible través del portal EarthData (<https://www.earthdata.nasa.gov>) de la NASA.

El sensor OLI captura datos en 9 bandas a lo largo del espectro electromagnético, desde el visible hasta el infrarrojo de onda corta (Tabla 2), con una precisión radiométrica en un rango dinámico de 12 bits, lo que mejora la relación señal/ruido global en comparación con los instrumentos de las misiones anteriores Landsat 1-7 de 8 bit, permitiendo así una mejor caracterización del estado y la condición de la cubierta terrestre.

Banda	Nombre	Longitud de onda	Resolución Espacial
Banda 1	Coastal Aerosol	0,43 – 0,45 μm	30 m
Banda 2	Blue	0,450 – 0,51 μm	30 m
Banda 3	Green	0,53 – 0,59 μm	30 m
Banda 4	Red	0,64 – 0,67 μm	30 m
Banda 5	Near-Infrared	0,85 – 0,88 μm	30 m
Banda 6	SWIR 1	1,57 – 1,65 μm	30 m
Banda 7	SWIR 2	2,11 – 2,29 μm	30 m
Banda 8	Panchromatic PAN	0,50 – 0,68 μm	15 m
Banda 9	Cirrus	1,36 – 1,38 μm	30 m

Tabla 2. Características de las bandas del sensor OLI a bordo del satélite Landsat 8.**Table 2.** Features of the bands of the OLI sensor onboard the Landsat 8 satellite.

A través del portal EarthExplorer (<https://earthexplorer.usgs.gov>) del USGS (*United States Geological Survey*) se consultó el archivo de imágenes Landsat 8 y se seleccionaron 8 escenas con la menor cobertura nubosa posible, capturadas durante julio de 2013 (Tabla 3), coincidiendo con la estación seca que en el caso de Angola corresponde al invierno austral.

<i>Path-row</i>	Fecha Adquisición	Cobertura nubes %	Calidad imagen (sobre 10)	Azimut Solar	Ángulo Elevación Solar
181-71	21-jul-2013	0	9	40,44	43,10
181-72	21-jul-2013	0,01	9	39,81	41,87
180-71	14-jul-2013	0	9	39,22	42,27
180-72	14-jul-2013	0,01	9	38,63	41,02
179-71	23-jul-2013	0	9	40,82	43,39
179-72	23-jul-2013	0	9	40,18	42,16
178-71	16-jul-2013	0,01	9	39,55	42,48
178-72	16-jul-2013	0	9	38,95	41,23

Tabla 3. Descripción de las escenas Landsat 8 utilizadas.**Table 3.** Description of the used Landsat 8 scenes.

Descargadas estas escenas con un nivel-1 de procesado (calibración radiométrica y orto-rectificación) fueron objeto de varias fases de procesado para su posterior análisis con fines cartográficos:

Pre-procesado

El pre-procesamiento de las escenas Landsat 8 incluye la corrección radiométrica y la corrección atmosférica de los datos adquiridos por el sensor (Fig. 2). Para transformar los niveles digitales (ND) de la imagen en valores de reflectancia a techo de la atmósfera (TOA, *Top Of Atmosphere*) se siguió la metodología descrita en el Manual del usuario de Landsat 8 (USGS, 2019) empleando los coeficientes de re-escalado radiométrico proporcionados en el archivo de metadatos. Posteriormente, mediante la corrección atmosférica, los valores se transforman en reflectividad superficial (BOA, *Bottom Of Atmosphere*). En nuestro caso, para eliminar el efecto de la atmósfera se aplicó el algoritmo QUAC (*QUick Atmospheric Correction*) (Bernstein, 2012) del software ENVI (*Exelis Visual Information Solutions, Boulder, Colorado*). Finalmente, las 8 escenas se mosaicaron en una única imagen.

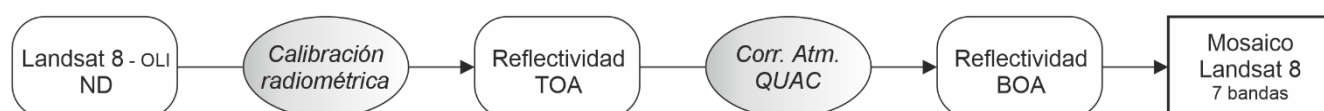


Figura 2. Flujo de trabajo de la Fase de Pre-procesado.

Figure 2. Workflow of the Preprocessing Phase.

Procesado

Para la interpretación de las unidades cartográficas en este sector de la Cuenca del Kalahari a partir de la imagen Landsat se emplearon un conjunto de técnicas comúnmente empleadas en el análisis geológico. Se utilizaron diferentes combinaciones de bandas del sensor OLI para obtener una visión general de los materiales, por ejemplo, la composición en falso color RGB (753) que sirve para evidenciar arcillas, vegetación y óxidos de hierro en un contexto amplio o la composición en color natural RGB (432). Tanto las composiciones de color, como las bandas individuales representadas en escala de grises, constituyen escenarios útiles para definir y apoyar otras capas de información temática. Las relaciones entre las bandas OLI (cocientes) se usaron para mejorar la discriminación de ciertas litologías, con la ventaja adicional de que eliminan las variaciones de brillo, acentúan las diferencias espectrales entre las bandas y borran el efecto de la topografía (Gupta, 2003). Los cocientes 4/2 y 6/5 permiten identificar depósitos ferruginosos, así como 6/7 distingue arcillas residuales y transportadas. Además de estos índices geológicos se calcularon otros índices como: $NDVI = (5 - 4) / (5 + 4)$ (*Normalised Difference Vegetation Index*) y $MNDWI = (3 - 6) / (3 + 6)$ (*Modified Normalised Difference Water Index*) para valorar la cubierta de vegetación y los cuerpos de agua, respectivamente.

A parte de estas técnicas comunes en geología, se aplicó la técnica que desarrolló Wildfors & Creasy (2002) para discriminar diferentes materiales del regolito: una combinación en color específica que incorpora el resultado del Análisis de Componentes Principales Dirigidos (DPCA, *Directed Principal Component Analysis*), un cociente y una suma de bandas. La técnica DPCA es una variante del Análisis de Componentes Principales (PCA, *Principal Component Analysis*) utilizada en la prospección minera (Fraser & Green, 1987; Fraser, 1991), particularmente en áreas donde la presencia de vegetación enmascara la firma espectral mineralógica (Crósta & Souza, 2009). Por su parte, el PCA es una técnica estadística multivariante que correlaciona las similitudes inherentes de las bandas como consecuencia de la información redundante que contienen para reducir la dimensionalidad de los datos. La técnica de DPCA utiliza como entrada dos cocientes, en nuestro caso, 5/4 (vegetación) y 6/7 (minerales de la arcilla). La influencia de la vegetación, que es común a los dos ratios de entrada, queda recogida en el primer componente (DPC1), de manera que en el segundo componente principal de este análisis (DPC2) se separa la información espectral relacionada con la presencia de arcillas. Esta imagen «arcilla» resultante, Wildfors & Creasy (2002) la combinan con el cociente 6/5 y la suma de bandas 7+2 en una imagen compuesta en falso color RGB (Fig. 3). La relación 6/5 destaca los materiales ferruginosos y la suma 7+2, los materiales ricos en sílice. La imagen final esperable debería mostrarse como un compuesto de tres bandas con la arcilla en rojo, el hierro en verde y la sílice en azul, donde sería fácil identificar depósitos arcillosos, ferruginosos y arenosos. Sin embargo, en el caso que nos ocupa, analizando la matriz de autovalores (Tabla 4), se observa que el peso del autovector del segundo componente principal dirigido para cociente de la arcilla (ratio 6/7) es de signo negativo, lo que significa que en esta composición RGB, las arcillas no aparecen representadas en tonos rojos, sino por su color complementario que es el cian, siguiendo la interpretación del signo y la magnitud de los autovectores que describen Carranza & Hale (2002).

Todas estas imágenes derivadas de las escenas Landsat 8 pueden integrarse adecuadamente con los datos de espectroscopia de rayos gamma, ya sean los mapas de cada elemento radioactivo o el mapa ternario radiométrico, y superponerse al MDE para mejorar la visualización del terreno e interpretar diferentes unidades cartográficas en la Cuenca del Kalahari (Fig. 4). La interpretación visual

de las imágenes resultantes, realzada y mejorada mediante ajustes del histograma de color y del brillo y contraste, contribuyó en su conjunto al conocimiento litológico y morfológico de la zona.

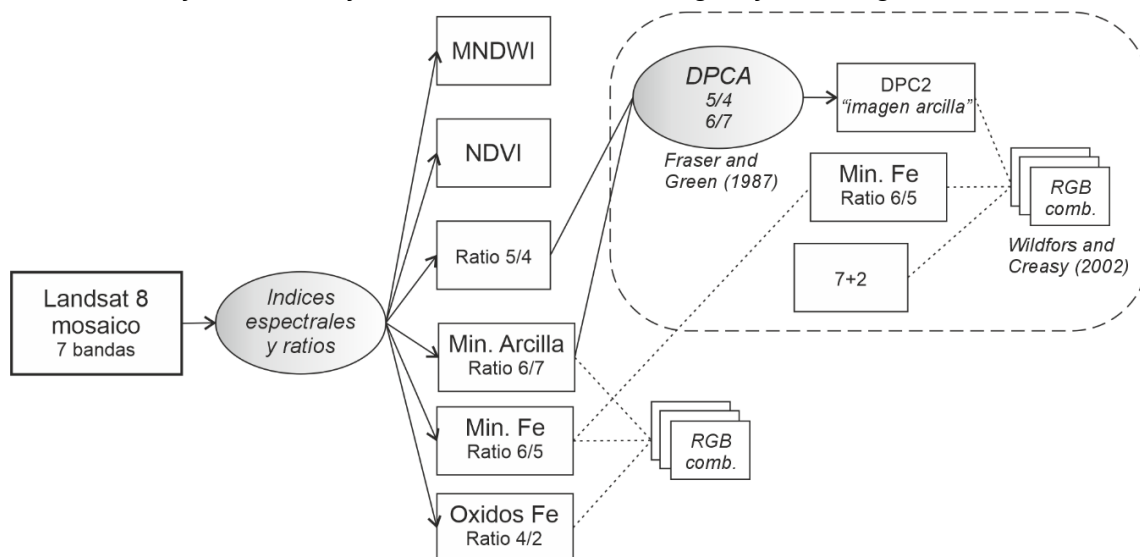


Figura 3. Flujo de trabajo de la Fase de Procesado.

Figure 3. Workflow of the Processing Phase.

<i>Autovectores</i>	Ratio6/7	Ratio5/4
Eigenvector 1 (DPC1)	-0,153596	-0,988134
Eigenvector 2 (DPC2)	-0,988134	0,153596
<i>Autovalores</i>	% Variance	
Eigenvalue 1 (DPC1)	0,579142	97,80
Eigenvalue 2 (DPC2)	0,012987	2,20
Σ	0,592129	100

Tabla 4. Matriz de autovectores (*eigenvectors matrix*) y autovalores (*eigenvalues*) del DPCA del mosaico.

Table 4. Eigenvectors matrix and eigenvalues of the DPCA of the mosaic.

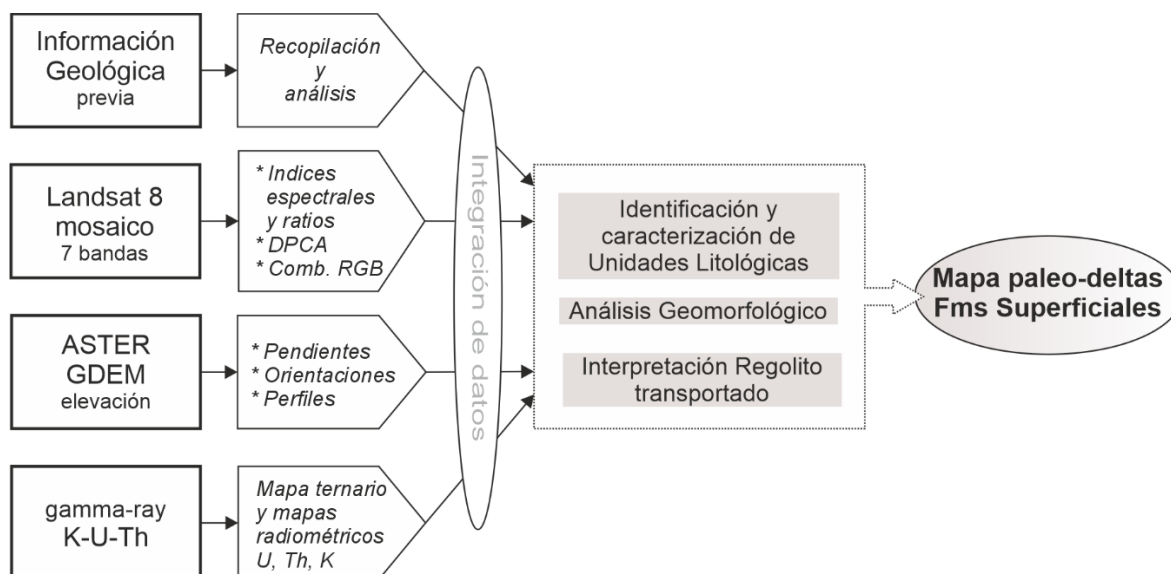


Figura 4. Flujo de análisis e interpretación integrada de la cartografía de la cuenca del Kalahari a partir de métodos radiométricos y teledetección.

Figure 4. Integrated analysis and interpretation flow of the Kalahari Basin mapping from radiometric and remote sensing methods.

4. Aplicación de la metodología a la Cartografía de la Cuenca del Kalahari

4.1. Paleosistema deltaico del Cubango y cuenca actual de drenaje

El paleodelta del Cubango ocupa la mitad oriental de la cuenca de Owambo (Fig. 1B). Destaca tanto por su morfología cónica como por sus grandes dimensiones (310 km de longitud) observables en las escenas de Landsat 8 y en el MDE (Fig. 5). Procede del piedemonte suroriental de los relieves centrales de Angola con una forma y orientación que no fueron descubiertas hasta los trabajos de Wilkinson *et al.* (2008; Fig. 1B), basados en el análisis de imágenes Landsat 4-5, MDE y mapa de rugosidad (Kreslavsky & Head, 1999, 2002); los dos últimos construidos con datos radar de la NASA (SRTM).

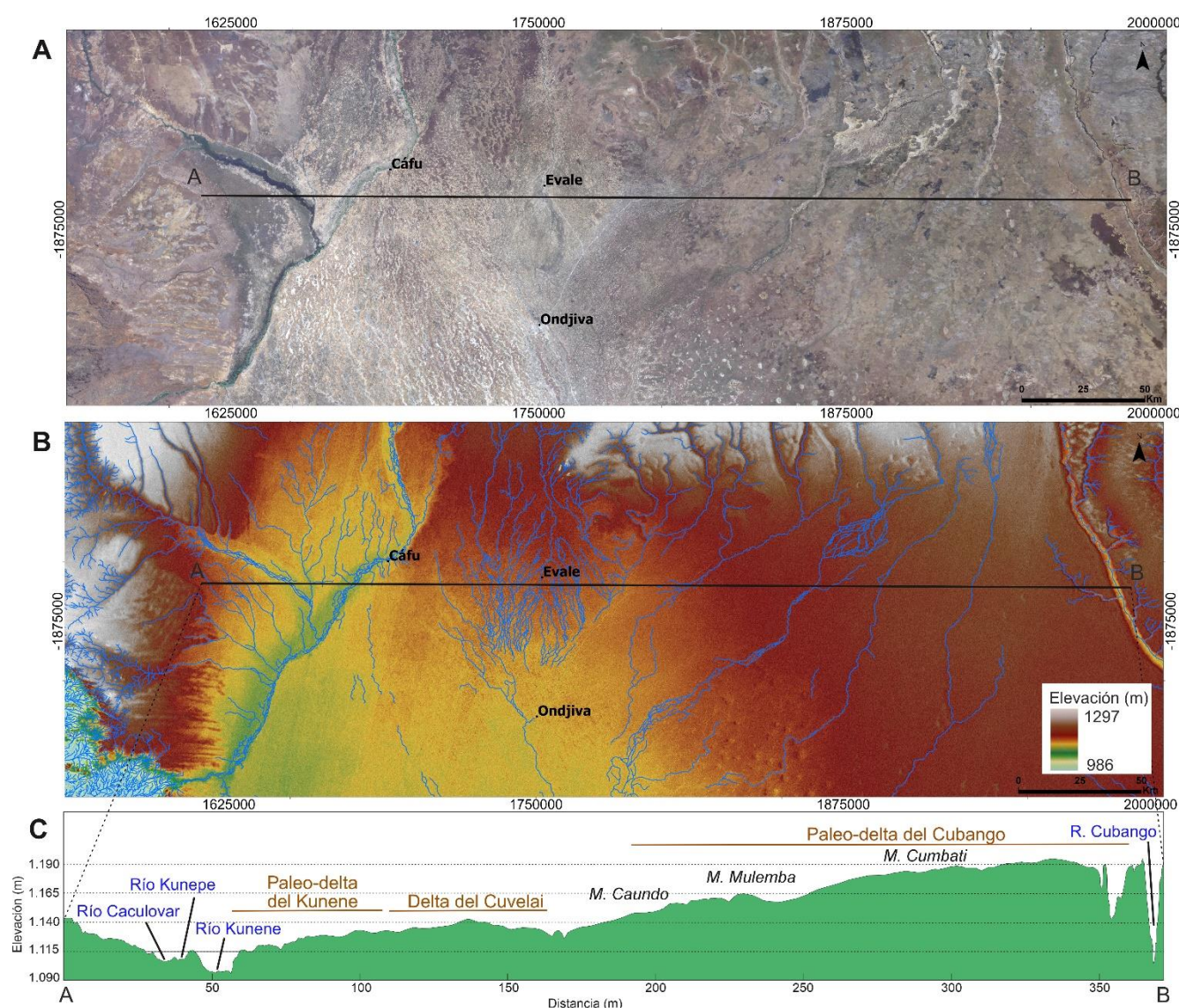


Figura 5. A) Mosaico de las escenas Landsat 8 de la zona de estudio, composición en color natural (432). B) Imagen ASTER Global DEM (pixel 30x30 m) redimensionada a 100x100 m y coloreada, con localización del corte topográfico transversal a los sistemas deltaicos. C) Perfil topográfico A-B que atraviesa la zona norte de los paleodeltas del Kunene y Cubango, así como la zona central del delta del Cuvelai.

Figure 5. A) Mosaic of Landsat 8 scenes of the study area, natural colour composition (432). B) ASTER Global DEM image (pixel 30x30 m) resized to 100x100 m and coloured, with location of the topographic cross section of the deltaic systems. C) A-B topographic profile crossing the northern part of the Kunene and Cubango palaeodeltas, as well as the central part of the Cuvelai delta.

Con un gradiente muy bajo y una suavidad topográfica extrema cumple los principales requisitos de un gran abanico deltaico; sin embargo, es difícil identificar canales o paleocanales en su superficie actual (Wilkinson *et al.*, 2023). Se trata de un paisaje formado por extensas plataformas modeladas en arenas de tipo Kalahari con una vegetación leñosa alta (Mendelsohn *et al.*, 2013), que dibuja una superficie convexa más marcada que el resto de abanicos de la mitad norte de la cuenca (Wilkinson, 2014; Fig. 5C). La naturaleza arenosa de este sistema deltaico destaca en el mapa radiométrico ternario por la baja concentración en elementos radiactivos, reflejada en los tonos blancos (utilizando la paleta de color *Cian-Magenta-Yellow*-CMY- blanco es sinónimo de ausencia de los tres elementos radiactivos y negro es la suma de los tres elementos), y en las imágenes radiométricas de K y Th con valores similares a las de las arenas del Kalahari superior (Fig. 6).

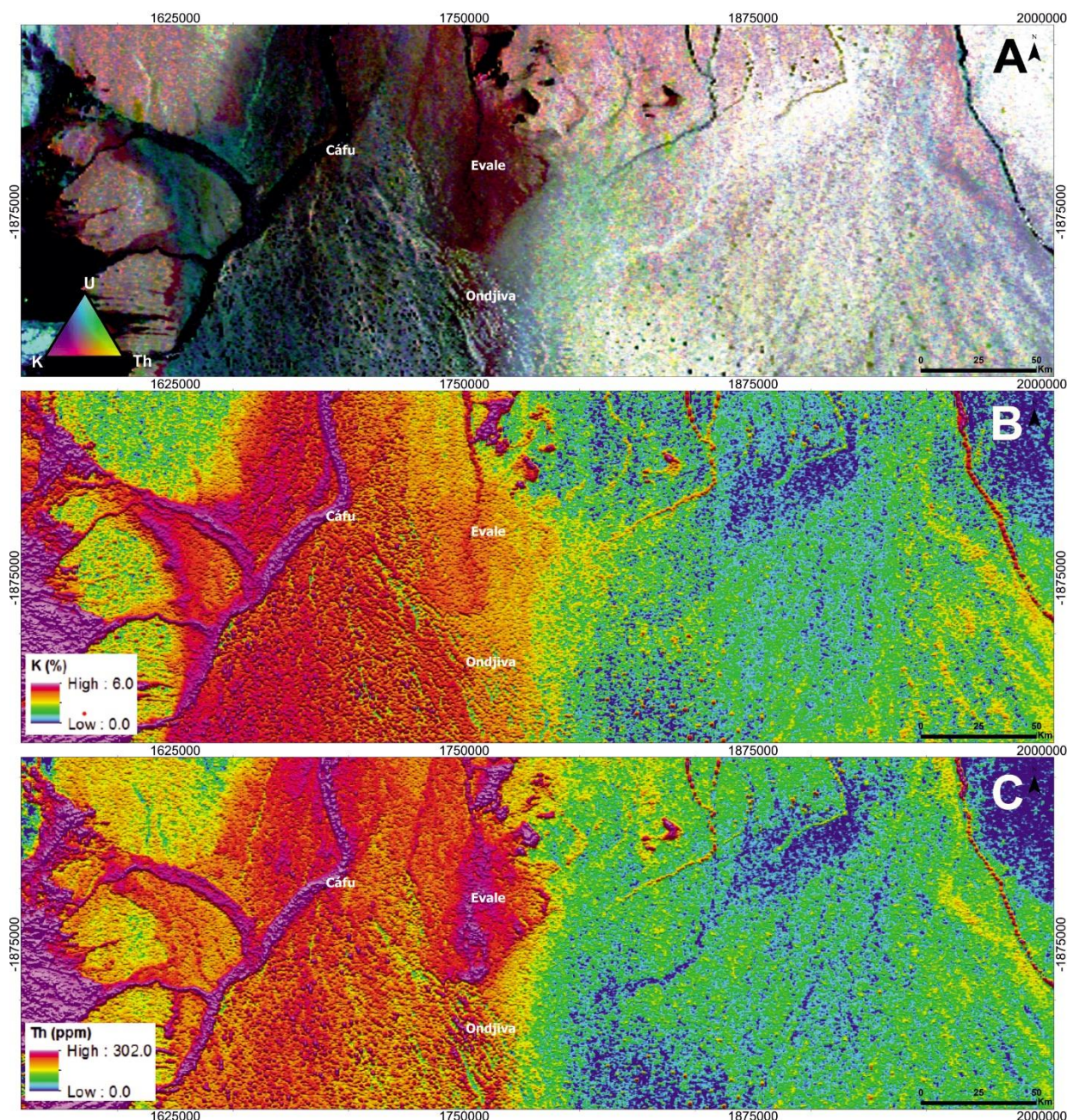


Figura 6. Imágenes radiométricas de la zona de estudio. A. Mapa radiométrico ternario del U, Th y K, utilizando la paleta de color *Cian-Magenta-Yellow* (CMY), donde el blanco es la ausencia de los tres elementos y el negro es la suma de los tres elementos radioactivos. B. Mapa de la concentración de K en %. C. Mapa de la concentración de Th en ppm.

Figure 6. Radiometric images of the study area. A). Ternary radiometric map of U, Th and K, using the Cyan-Magenta-Yellow (CMY) colour palette, where white is the absence of the three elements and black is the sum of the three radioactive elements. B) Map of the K concentration in %. C) Map of Th concentration in ppm.

Pocos cursos de aguas discurren por esta superficie: Caundo, Mulemba-Nhenha-Tchimpolo, Muculunga o Cumbati, que se caracterizan por su funcionamiento estacional y por formar amplios valles encajados en artesa con vertientes bien definidas (Feio, 1966), mostrando amplitudes de cientos de metros y un encajamiento máximo de 6-9 m. Estos cursos localmente conocidos como *muolas* se distribuyen de forma radial por la superficie del abanico entre los ríos Cubango y Cuvelai y recogen una escorrentía insignificante de la bien regada meseta angoleña del Bié (Mendelsohn & El Obeid, 2004). Algunos de estos cursos se reconocen en las imágenes radiométricas del K y Th por las elevadas concentraciones que presentan, debido fundamentalmente a la presencia de materiales arcillosos en sus sedimentos, procedentes de la alteración de rocas meta-vulcanosedimentarias ricas en Fe del Grupo Jamba y de los metasedimentos del Grupo Chivanda que atraviesan en sus zonas de cabeceras.

Aguas abajo, las *muolas* raramente terminan alcanzando el Etosha. En el mosaico RGB: DPC2 (5/4, 6/7) _ 6/5 _ 7+2, así como en el MDE, se observa que en el borde occidental y meridional del delta del Cubango, estos cursos aparecen bloqueados por arenas eólicas (Fig. 7). Se trata de dunas aisladas, de tipo *lunettes*, formadas por arenas finas a muy finas limo-arcillosas que presentan pequeñas cubetas de deflación asociadas y desecadas (Fig. 7). Estos depósitos dunares y las cubetas de deflación asociadas son muy abundantes en toda la orla occidental del abanico, haciéndose cada vez más continuos hacia el sur y hacia el este de Angola, dando lugar en la región namibia de Caprivi a un extenso campo de cordones dunares paralelos con direcciones O-E y ONO-ESE y disectado por el actual sistema de drenaje del río Cubango-Okavango (Fig. 1). Como consecuencia, las *muolas* constituyen paleocanales discontinuos lo suficientemente espaciados como para no haber sido reconocidos anteriormente (Wilkinson et al., 2023). Estos canales tienen su reflejo en la mayor proporción de potasio (0,2-0,4 %K) como consecuencia de la acumulación de sedimentos enriquecidos en K del área de origen. Sin embargo, en el mosaico compuesto con la combinación RGB de Wildfors & Creasy (2002), únicamente se distinguen de forma muy marcada las cubetas de deflación, que aparecen representadas en blanco y en tonos cian (Fig. 7) debido a la presencia de sales y arcillas. En este caso, relacionado con el signo negativo del autovector correspondiente al DPC2 (Tabla 4) los píxeles de color rojo no se corresponden con la reflectancia de las arcillas, sino con la de la vegetación que rodea las cubetas y ocupa en parte estas *muolas*. Las dunas aisladas se han identificado fundamentalmente gracias al MDE. Los tonos verdes de la imagen se corresponden con las arenas dunares más superficiales que presentan coloraciones rojizas por su composición cuarzo-ferruginosa.

4.2. Paleosistema deltaico del Cunene, delta del Cuvelai y cuencas actuales de drenaje

El paleodelta del Cunene se extiende en la mitad occidental de la cuenca (Fig. 1). Es más pequeño y menos evidente que el Cubango, ya que tras ser capturado hacia la costa por un río de dirección E-O bajo la influencia de la neotectónica en el Plioceno-Pleistoceno inferior (Allanson et al., 1990) tuvo lugar la superposición del sistema fluvial del Cuvelai (Miller et al., 2010). Dicha captura produjo una pérdida importante de aportes al paleo-lago Etosha (Feio, 1966) que, junto con una extremización del clima hacia condiciones más áridas, detectada en los sedimentos del lago a finales del Plioceno (Hipondoka, 2005), desencadenó importantes cambios en el nivel de base del lago y, por tanto, en los sistemas fluviales que lo alimentaban. Habría que señalar que la topografía tan apaisada de la región permite cambios sustanciales en las zonas de captación sin necesidad de una actividad tectónica importante (Hipondoka, 2005), lo que explicaría la desconexión del sistema del Cubango y el rápido encajamiento de las *muolas* en los sedimentos arenosos del sistema del Cubango, favoreciendo la preservación de su morfología en planta.

El relleno sedimentario del paleodelta del Cunene en territorio angoleño fue descrito por Halpenny (1957) y Feio (1966). Está constituido principalmente por arenas finas con lentejones de gravas pequeñas, limos y arcillas, cementados por carbonatos en forma de concreciones y costras. También pueden presentar cementos ferruginosos y silicios en función de la distancia del área fuente.

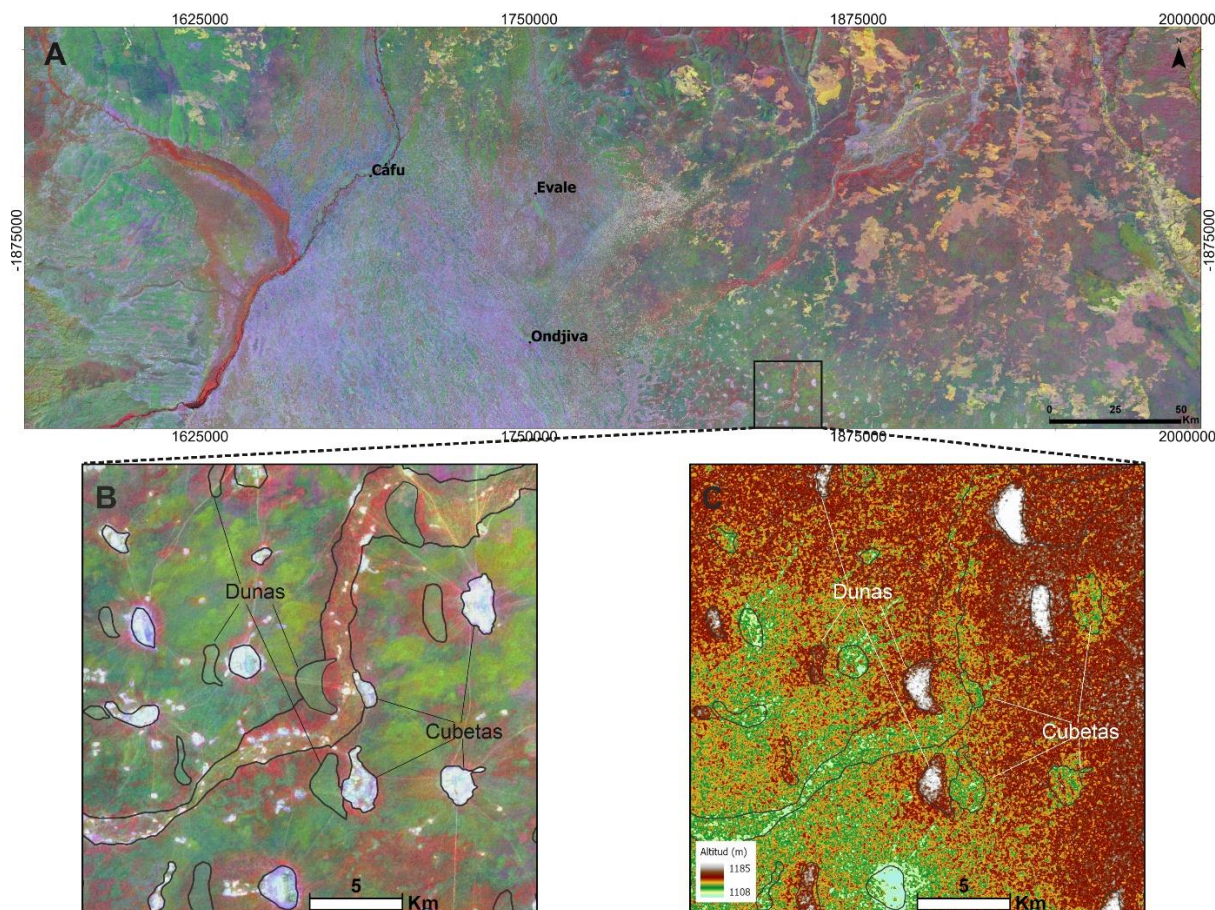


Figura 7. A) Mosaico de escenas Landsat 8 representado con la combinación RGB de Wildfors & Creasy (2002) de la zona de estudio: DPC2 (5/4, 6/7)_6/5_7+2. B) Detalle del mosaico de las dunas aisladas y cubetas de deflación localizadas en el borde meridional de la zona de estudio. C) Detalle de las dunas y cubetas sobre el MDE.

Figure 7. DPCA mosaic of Landsat 8 scenes represented with the Wildfors & Creasy (2002) RGB combination of the study area: DPC2 (5/4, 6/7)_6/5_7+2. B) Detail of the mosaic of isolated dunes and deflation basins located at the southern edge of the study area. C) Detail of the dunes and basins on the DEM.

En superficie, este sistema deltaico presenta un dispositivo muy particular (Feio, 1966), formado por una gran cantidad de canales anchos y someros ramificados que fluyen en direcciones N-S a NO-SE (Fig. 5). Las zonas más deprimidas y temporalmente encharcadas se conocen localmente como *chanas* y se distinguen bien de las zonas más elevadas denominadas *mufitos*. También son características de este paisaje las *chanas* completamente aisladas y rodeadas por *mufitos*. Estas depresiones donde se conserva el agua de manera más o menos permanente son los llamados *ecangos*. El desnivel entre la parte más alta de los *mufitos* y la orilla de las *chanas* suele ser del orden de 2 o 3 m. Los fondos de las *chanas* están constituidos por arenas más o menos sueltas de tonos grises y amarillentos, siempre claros, aunque a veces se pueden encontrar horizontes húmicos superficiales (arenas negras sueltas), concreciones calcáreas a cierta profundidad y arenas arcillosas un poco más consolidadas. La construcción de los *mufitos* tiene lugar tras la colmatación de las *chanas*. Esta micromorfología fue interpretada por Feio (1966) como el modelado de la superficie de relleno del Cunene en un ambiente de sedimentación endorreica, en la que el Cunene alimentaba el lago Etosha. La captura del Cunene hacia el Atlántico produjo la casi paralización de estas formas. En la actualidad, únicamente se produce flujo debido a las aguas pluviales. Este entramado de *chanas*, *mufitos* y *ecangos* anchos contrastan tanto en mitad del mosaico de imágenes Landsat 8 representado con la combinación RGB de Wildfors & Creasy (2002) en tonos morados, cian, verdes y azules mostrando estas alternancias composicionales superficiales: arenas, arcillas, vegetación y agua (Fig. 7); como en el mosaico representado en color natural (432), donde destacan las morfologías canaliformes en tonos claros (Fig. 5). En ambos casos, se observa que todo este entramado se extiende desde el curso actual del río Cunene hasta una línea imaginaria que une el *Posto Zootécnico de Cáfu* y el pueblo de Ondjiva.

Sobre esta superficie de relleno del Cunene se sobreimpone el sistema deltaico del Cuvelai, abarcando el área de influencia de los ríos Cuvelai y Mui. Estos ríos fluyen con una dirección N-S en valles individuales hasta la latitud del pueblo de Evale, donde se unen y se ramifican en estrechos brazos constituidos por valles con tramos más profundos y agua permanente, y tramos someros y secos. La diferencia de estos canales deltaicos con las *chanas* y *ecangos* que circulan por la superficie del Cunene es de tipo micromorfológico. Mientras que la superficie del paleodelta del Cunene muestra *chanas* anchas, el sistema del Cuvelai se caracteriza por la estrechez de sus canales (Feio, 1966; Mendelsohn et al., 2013), diferenciables mediante las imágenes Landsat 8 y sus productos derivados, combinados con el MDE y las imágenes radiométricas (figs. 5, 6 y 7). Los sedimentos del delta del Cuvelai dibujan un cuerpo cónico constreñido entre el río Mui al oeste y el río Caundo al este, mucho más pequeño que los que dibujan los paleodeltas del Cubango y del Cunene (Fig. 5). A diferencia de los otros dos sistemas que son inactivos, en el delta de Cuvelai se observa un dominio de los procesos sedimentarios frente a los procesos erosivos a través del ligero aumento de la topografía en su área de influencia (perfil topográfico A-B en Fig. 5). El río Cuvelai constituye el canal alimentador principal del delta, que como se puede observar en el MDE aparece actualmente colmatado (Fig. 5). Se encuentra incidido por el cauce principal del río únicamente hasta la localidad de Evale. Esta característica es observable especialmente en el mapa radiométrico ternario y en los mapas de K y Th (Fig. 6), debido a la presencia de sedimentos arcillosos en sus depósitos de fondo de valle. La alta concentración de Th de los sedimentos arcillosos hace que el mapa de este elemento radiactivo contribuya en gran medida a la cartografía del canal principal del río Cuvelai, sobre todo cuando se entremezcla en la densa red de *chanas* y *ecangos* en su borde sur (Fig. 6C). En este sector, con la ayuda del mosaico de escenas Landsat 8 representados con la combinación RGB de Wildfors & Creasy (2002) se identifican un conjunto de canales N-S que recogen sus aguas, además de las que aportan puntualmente las *chanas* que circulan por la superficie del paleodelta del Cunene y, en años de lluvias excepcionales, también se pueden sumar las aguas del río Caundo (*muola* que drena la superficie del paleodelta del Cubango; Fig. 7). Este mosaico nos permite cartografiar con detalle los canales que recogen estas aguas identificados en el mapa del Th. Estos canales localizados entre los paleodeltas del Cunene y Cubango, y denominados Zona de Drenaje Central de la Cuenca del Cuvelai-Etosha por Mendelsohn et al. (2013), representan la actual área deltaica del delta del Cuvelai que va perdiendo profundidad aguas abajo para fundirse con la planicie y que en años de intensa pluviosidad pueden alcanzar y alimentar el Etosha a través del río Ekuma.

La cuenca de drenaje del río Cunene discurre principalmente por áreas graníticas, tanto paleoproterozoicas (granitoides calco-alcalinos orosíricos) como mesoproterozoicas (granitos rojos del Complejo Anortosítico del Cunene), y de manera más escasa, por rocas metamórficas ortoderivadas, lo que hace que tenga gran contenido de K, Th y U; mientras que la cuenca del río Cuvelai se restringe a la parte más meridional y degradada de la meseta, con un recorrido más corto, que nace en los relieves de rocas meta-vulcanosedimentarias del Grupo Jamba (Arcaico) y de los metasedimentos del Grupo Chivanda (Paleoproterozoico), es decir itabiritas, ricas en Fe, depósitos vulcanosedimentarios ácidos y básicos, y depósitos sedimentarios. También atraviesa rocas graníticas y volcánicas paleoproterozoicas (Fig. 1B).

La diferencia composicional del área fuente de ambas cuencas y de la longitud de sus recorridos se manifiesta en la diferente carga sedimentaria y, por tanto, en la diferente signatura radiométrica de los sedimentos vinculado a los dos ríos (Fig. 6). Las áreas que ocupan los sistemas deltaicos del Cunene y Cuvelai muestran una concentración de K alta, mayor en la zona del paleosistema del Cunene y algo menor en el área que ocupa el actual sistema del Cuvelai, donde también se observan valores altos de Th (Figs. 6B y 6C). La elevada concentración de K de los sedimentos del paleo Cunene (Fig. 6B), así como del resto de radioelementos, tienen su origen en la alta saturación en elementos radioactivos de las rocas graníticas y metamórficas ácidas por las que ha discurrido y discurre actualmente el sistema y por su extenso recorrido (Fig. 1B), siendo también responsable del enriquecimiento de K que presentan los sedimentos más recientes del sistema, como los depósitos de fondo de valle del actual río Cunene y depósitos aluviales asociados (Fig. 6). Por su parte, las rocas meta-vulcanosedimentarias ricas en Fe, alternancias de itabiritas ricas en Fe y Si, con conglomerados, cuarcitas y metagrauvacas y cuerpos volcánicos ácidos y básicos del Grupo Jamba; y los metasedimentos, principalmente cuarzo-

areníticos, grauvacas, conglomerados y rocas pelíticas del Grupo Chivanda, por los que circula el sistema del Cuvelai da lugar a un aumento de la fracción arcillosa de los sedimentos, disminuyendo la concentración relativa de K y aumentando el contenido de Th asociado a las fracciones más finas. El mapa radiométrico ternario (Fig. 6A) muestra el cauce actual del río Cunene y las zonas de paleocauces asociadas saturadas en los tres elementos radiactivos (K+Th+U).

5. Unidades cartográficas diferenciadas en la Cuenca de Owambo

Para la realización de la cartografía geológica a escala 1:250000 de la cuenca de Owambo en Angola, los trabajos de Wilkinson (2014) y Wilkinson *et al.* (2008, 2023), así como los de Miller *et al.* (2010) en la parte namibia de la cuenca han resultado fundamentales. La distinción de tres grandes sistemas aluviales frente a una gran mancha de cuaternario indiferenciado que ofrecían las cartografías previas (p.e., Carvalho, 1982) al proyecto PLANAGEO supuso un importante avance en el contexto geológico de la región. Sin embargo, los contornos de esos grandes sistemas deltaicos seguían siendo muy burdos para la escala de trabajo del proyecto. Aplicando y adaptando la metodología del CRC LEME (Papp, 2002) para realizar el Mapa de Regolito de Angola a escala 1:250000 en las primeras fases del proyecto, comprobamos la utilidad del algoritmo DPCA para la definición de las unidades de regolito transportado, es decir, para identificar formaciones superficiales originadas a partir del transporte y el depósito de materiales procedentes de la meteorización física y de la alteración química de las rocas, y que presentan una correlación directa con las unidades cuaternarias del mapa geológico (depósitos de origen fluvial, gravitacional, eólico, etc.). El DPCA es un tipo de procesado de las imágenes satélite que facilita la identificación de depósitos arcillosos en áreas muy vegetadas (Fraser & Green, 1987). Esta técnica unida a las imágenes radiométricas (U-Th-K) resultantes de la interpretación de la geofísica aeroportada han demostrado ser muy útiles no sólo para cartografiar formaciones cuaternarias, sino también para comprender los procesos geomorfológicos.

A continuación, se detallan las unidades geológicas diferenciadas a partir de este estudio (Fig. 8):

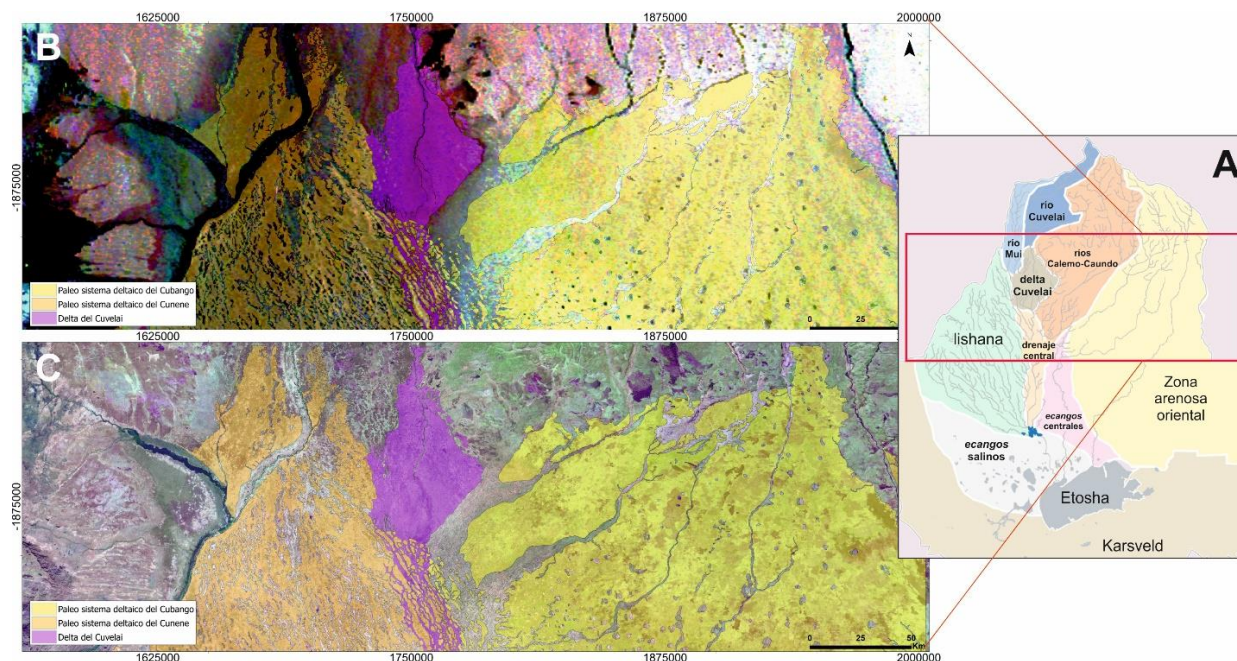


Figura 8. A) Unidades de la cuenca hidrográfica de Cuvelai-Etosha de Mendelson *et al.* (2013). B) Grandes unidades geológicas diferenciadas en la zona de estudio superpuestas sobre el mapa radiométrico ternario del U, Th y K, utilizando la paleta de color *Cian-Magenta-Yellow* (CMY). C) Grandes unidades geológicas diferenciadas en la zona de estudio superpuestas sobre el mosaico de escenas Landsat 8, composición en falso color (654).

Figure 8. A) Units of the Cuvelai-Etosha watershed from Mendelson *et al.* (2013). B) Large differentiated geological units in the study area superimposed on the ternary radiometric map of U, Th and K using the Cyan-Magenta-Yellow (CMY) colour palette. C) Large discrete geological units in the study area superimposed on the Landsat 8 scene mosaic, false colour composition (654).

5.1. Paleosistema deltaico del Cubango

Los límites de este paleodelta son bien reconocidos tanto en las imágenes radiométricas como en las de satélite. La composición principalmente cuarcítica procedente de la erosión, transporte y sedimentación de las arenas del Grupo Kalahari que conforman el piedemonte de los relieves centro-angoleños contrasta claramente en el mapa ternario *gamma ray* y en el mosaico con la combinación RGB de Wildfors & Creasy (2002). A groso modo, este límite coincide bastante bien con el límite definido por Wilkinson (2014) y Wilkinson et al. (2008, 2023). Si bien, cuesta identificarlo en el borde más suroccidental de la zona de estudio, donde se sobreimpone la red de canales deltaicos procedentes del delta del Cuvelai y multitud de dunas aisladas con cubetas de deflación asociadas desecadas, indicativas del importante papel que jugó la deflación eólica en el abandono de este sistema deltaico. La cartografía de las dunas y cubetas de deflación se realizó a partir de las imágenes satélite y productos derivados, y fueron contrastadas con el MDE (Fig. 7). Aunque esta orla de dunas desdibuja las zonas distales del abanico, todavía se intuye cierta morfología lobular.

5.2. Paleosistema deltaico del Cunene y delta del Cuvelai

El límite entre el paleo Cunene y el delta del Cuvelai no es un límite tan claro como el borde del paleodelta del Cubango. En las imágenes satélites y en las imágenes de los radioelementos por separado no son nada evidentes y se presta a bastante interpretación y debate. Sin embargo, en el mapa radiométrico ternario (Fig. 6A) que combina los tres elementos, el área de influencia del delta del Cuvelai aparece en tonos verdes bien marcado (U+Th). También aparece con tonos verdosos los canales centrales que circulan N-S, al sur del delta del Cuvelai entre los ríos Mui y Cuvelai. Los contornos que dibujan el delta y los canales centrales en este mapa muestran un área diferente a la que propone Wilkinson (2014) y Wilkinson et al. (2008, 2023) para el delta del Cuvelai, la cual incluye parte de lo que estamos considerando paleodelta de Cunene. Sin embargo, sí se ajusta al límite que definió Feio (1966) para la micromorfología conservada del antiguo Cunene desde su curso actual hasta una línea imaginaria que une el *Posto Zootécnico de Cáfu* y el pueblo de Ondjiva (Fig. 5), y también se corresponde bien con los bordes del delta del Cuvelai, área de *lishana* (nombre que define los canales de aguas someros de la región) y drenaje central que definió Mendelsohn et al. (2013; Fig. 8).

5.3. Chanas, ecangos y depósitos de fondos de valle, dunas aisladas y cubetas de deflación asociadas

A pesar de que las escenas Landsat 8 empleadas en este estudio fueron adquiridas durante la estación seca para evitar, en la medida de lo posible, la cobertera de nubes, nos han permitido diferenciar bien las zonas encharcadas, ya que el 2013 fue un año relativamente lluvioso. Así se han podido cartografiar con detalle las *chanas* y *ecangos* sobre la superficie del paleo Cunene y las pequeñas cubetas de deflación asociadas a las numerosas dunas aisladas, muchas de las cuales contenían agua aun sin evaporar. También nos han permitido identificar las dunas y los depósitos de fondos de valle que dejan los cursos actuales de los ríos Cubango y Cunene y sus afluentes, así como de los cursos que atraviesan la superficie del paleodelta del Cubango y que acaban en el área deltaica central o incluso antes de alcanzarla, taponados por algunas de estas dunas. Las dunas presentan tamaños variables. Se cartografiaron las que tienen representatividad a escala 1:250000. Hacia el este se van haciendo más grandes y continuas, donde se van convirtiendo progresivamente en un extenso campo de cordones dunares de dirección E-O por toda la franja de Caprivi (Namibia).

Conclusiones

En zonas remotas, como el norte de la cuenca de Owambo en el extremo sur de Angola, la elaboración de una cartografía geológica a partir de las típicas campañas de campo puede acabar

siendo una tarea muy complicada y casi imposible de realizar. Los trabajos realizados durante Proyecto PLANAGEO en este gran depocentro de la Cuenca del Kalahari, relleno por sedimentos cenozoicos de tres grandes sistemas fluvio-deltaicos (Cunene, Cubango y Cuvelai), han demostrado que el análisis combinado del MDE, imágenes Landsat 8 e imágenes radiométricas resultantes de la interpretación de los datos aerogeofísicos ha sido esencial para la cartografía geológica de esta vasta extensión fundamentalmente arenosa. El algoritmo DPCA aporta información sobre el contenido en arcillas, óxidos de hierro y sílice de los materiales que, en ocasiones, no resulta definitorio para identificar las diferentes formaciones superficiales. Su uso combinado con las imágenes radiométricas, particularmente con el mapa radiométrico ternario del K, Th y U, ha resultado fundamental para separar los sistemas deltaicos del Cunene y del Cuvelai, alimentados por cuencas de drenajes que atraviesan áreas fuentes de composición similar. Se demuestra que esta metodología desarrollada originalmente para elaborar mapas de regolito, es francamente útil para cartografiar formaciones superficiales y comprender la evolución geomorfológica de la Cuenca del Kalahari.

Agradecimientos

Este trabajo es resultado del Plan Geológico Nacional de Angola (PLANAGEO). Este proyecto contó con el apoyo del Gobierno de la República de Angola y fue ejecutado por el Instituto Geológico de Angola (IGEO), bajo la supervisión del Ministerio de Recursos Minerales, Petróleo y Gas de Angola (MIREMPET). También apreciamos la valiosa contribución del personal de la empresa *Impulso Industrial Alternativo S.A.* a este proyecto, así como la revisión de este manuscrito realizada por la Dra. Graça Brito y el Dr. Eduardo García-Meléndez mejorándolo notablemente.

Authorship contribution statement

Raquel Martín Banda: Conceptualization, Methodology, Writing - Original Draft, Visualization, Investigation, Validation, Formal analysis, Writing - Review & Editing, Supervision.

Maria Teresa López-Bahut: Conceptualization, Methodology, Software, Data Curation, Writing - Original Draft, Visualization, Investigation, Validation, Formal analysis, Writing - Review & Editing.

Juan Carlos Gumiel: Conceptualization, Methodology, Software, Data Curation, Visualization, Investigation, Validation.

Carmen Rey-Moral: Conceptualization, Methodology, Software, Data Curation, Writing - Original Draft, Visualization, Investigation, Validation, Writing - Review & Editing.

Maria del Carmen Feria: Methodology, Software, Data Curation, Visualization, Investigation.

Enrique Merino-Martínez: Conceptualization, Writing - Review & Editing, Supervision, Project administration.

José Luis García-Lobón: Project administration, Funding acquisition.

Américo da Mata Lourenço Victorino: Resources, Project administration.

Referencias

- Allanson, B.R., Hart, R.C., O'Keeffe, J.H., & Roberts, R.D. (1990). The geomorphology of southern Africa. Inland waters of southern Africa: An ecological perspective. In: Dumont, H.J. (ed.), *Monographiae Biologicae*, 64. Springer, Dordrecht. doi: https://doi.org/10.1007/978-94-009-2382-9_2.
- Araújo, A. G., & Guimarães, F. (Coord.) (1998). *Geologia de Angola. Notícia Explicativa da Carta Geológica, à escala 1:1 000 000*. Publicações do Instituto Nacional de Geologia de Angola, 137 p.
- Bernstein, L.S., Jin, X., Gregor, B., & Adler-Golden, S. (2012). Quick Atmospheric Correction Code: Algorithm Description and Recent Upgrades. *Optical Engineering* 51, No. 11: 111719-1 to 111719-11.
- Brimhall, G.H., Dilles, J.H., & Proffett, J.M. (2006). The role of geologic mapping in mineral exploration. *Society of Economic Geologists, Special Publication*, 12, 221-241.

- Cahen, L., & Lepersonne, J. (1952). Equivalence entre le système du Kalahari du Congo Belge et les Kalahari Beds d'Afrique australe. *Mémoires du Société Belge Géologie, Paléontologie et Hydrologie*, 8, 1-64.
- Cahen, L., & Lepersonne, J. (1954). Etat actuel des connaissances relatives aux series mesozoiques de l'intérieur du Congo. *Bulletin da Societe Belge de Geologie*, 77, 20-37.
- Cahen, L., Jamote, A., Lepersonne, J., & Mortelmans, G. (1946). Etat actuel des connaissances relatives à la stratigraphie des Systemes du Kalahari et du Karroo au Congo Belge. *Bulletin du Service Geologique*, 2, 257-289.
- Carvalho, H. (Coord.) (1982). Carta Geológica de Angola à escala 1: 1 000 000. Publicações do Instituto de Investigação Científica Tropical, Lisboa Investigações Ultramar, Lisbon, pp. 26.
- Carranza, E.J.M., & Hale, M. (2002). Mineral imaging with Landsat Thematic Mapper data for hydrothermal alteration mapping in heavily vegetated terrane, *International Journal of Remote Sensing*, 23:22, 4827-4852, DOI: <https://doi.org/10.1080/01431160110115014>.
- Chorowicz, J. (2005). The East African rift system. *Journal of African Earth Sciences*, 43(1-3), 379-410.
- Colin, J-P. (1994). Mesozoic-Cenozoic lacustrine sediments in the Zaïre Interior Basin. In: Gierlowski-Kordesch E, Kelts K (eds.), *Global geological record of Lake Basins*, vol 4. Cambridge University, Press, Cambridge, 31-36.
- Crósta, A., & Souza Filho, C.R. (2009). Mineral Exploration with Landsat Thematic Mapper(TM)/Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+): A Review of the Fundamentals, Characteristics, Data Processing, and Case Studies. In: Bedell R., Crósta, A.P., & Grunsky, E. (eds.), *Remote Sensing and Spectral Geology. Reviews in Economic Geology*, 16, 59-82.
- De Ploey, J., Lepersonne, J., & Stoops, G. (1968). Sédimentologie et origine des sables da série des sables ocres et da série des "grès polymorphes" (Sytème du Kalahari) au Congo occidental. *Annales Musée Royal de L'Afrique Centrale, Série in-8, Sciences Geologiques*, Tervuren, Belgique, 61, 72 p.
- De Wit, M.J.C. (2007). The Kalahari Epeirogeny and climate change: differentiating cause and effect from core to space. *South African Journal of Geology*, 110 (2-3), 367-92.
- Dill, H.G., Kaufhold, S., Lindenmaier, F., Dohrmann, R., Ludwig, R., & Botz, R. (2013). Joint clay-heavy-light mineral analysis: a tool to investigate the hydrographic-hydraulic regime of late Cenozoic deltaic inland fans under changing climatic conditions (Cuvelai-Etoshia Basin, Namibia). *International Journal of Earth Sciences*, 102, 265-304. doi: <https://doi.org/10.1007/s00531-012-0770-7>.
- Du Toit, A.L. (1927). The Kalahari and some of its problems. *South African Journal of Science*, 24, 88-101.
- ENVI. Image processing and analysis software, <https://www.nv5geospatialsoftware.com/Products/ENVI>.
- Feio, M. (1966). A evolução do relevo da bacia endorreica do Cuanhama (Angola). *Finisterra*, 1 (1), 33-59, doi: <https://doi.org/10.18055/Finis2555>.
- Fraser, S.J. (1991). Discrimination and identification of ferric oxides using satellite Thematic Mapper data: a Newman case study. *International Journal of Remote Sensing* 12 (3), 635-641.
- Fraser, S.J., & Green, A.A. (1987). A software defoliant for geological analysis of band ratios. *International Journal of Remote Sensing*, 8 (3), 525-532. doi: <https://doi.org/10.1080/01431168708948659>
- Gärtner, A., Houben, G.J., Sitnikova, M.A., Miller, R. McG, Wang, F., Zieger-Hofmann, M., Zieger, J., & Linnemann, U. (2023). Multiproxy sediment provenance analysis of two megafans in the Owambo Basin, northern Namibia. *Journal of the Geological Society*, 180 (2), jgs2022-065, doi: <https://doi.org/10.1144/jgs2022-065>.
- Grecoff, N. (1958). Ostracodes du Bassin du Congo. III, Tertiaire. *Annales du Musée Royal du Congo Belge, Série 8, Sciences Géologiques, Volume 22*, 36 p.
- Gupta, R.P. (2003). *Remote Sensing in Geology*. Second edition. Springer. 655 p.
- Gupta, R.P. (2013). A Simplified Approach for Interpreting Principal Component Images. *Advances in Remote Sensing*, 2, 111-119.

- Haddon, I.G. (2005). The Sub-Kalahari Geology and Tectonic Evolution of the Kalahari Basin, South Africa. Ph.D. Thesis. University of Witwatersrand, Johannesburg, South Africa, 343 p.
- Haddon, I.G., & McCarthy, T.S. (2005). The Mesozoic-Cenozoic Interior sag basins of Central Africa: the Late-Cretaceous-Cenozoic Kalahari and Okavango basins. *Journal of African Earth Sciences*, 43, 316-333.
- Halpenny, L.C. (1957). Development of Groundwater in Parts of Angola, Portuguese West Africa. *World Mining Consultants*, New York, 105 p.
- Hipondoka, M.H.T. (2005). The Development and Evolution of Etosha Pan, Namibia. Ph.D. Thesis. Bayerischen Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Würzburg, Deutschland, 155 p.
- Houben, G.J., Kaufhold, S., Miller, R. McG., Lohe, C., Hinderer, M., Noll, M., Hornung, J., Joseph, R., Gerdes, A., Sitnikova, M., & Quinger, M. (2020). Stacked megafans of the Kalahari Basin as archives of paleogeography, river capture and Cenozoic paleoclimate of southwestern Africa. *Journal of Sedimentary Research*, 90, 980-1010.
- IAEA (International Atomic Energy Agency) (2003). Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data. IAEA-TECDOC-1363, Austria. ISBN: 92-0-108303-3.
- Jelsma, H.A., McCourt, S., Perritt, S.H., & Armstrong, R.A. (2018). The Geology and Evolution of the Angolan Shield, Congo Craton. In: Siegesmund, S., Basei, M.A.S., Oyhançabal, P., & Oriolo, S. (Eds.), *Geology of Southwest Gondwana, Regional Geology Reviews*. Springer International Publishing, Cham, 217-239. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68920-3_9
- Kreslavsky, M.A., & Head, J.W. (1999). Kilometer-scale slopes on Mars and their correlation with geologic units: initial results from Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA) data. *Journal of Geophysical Research*, 104, 21911-21924.
- Kreslavsky, M.A. & Head, J.W. (2002). Kilometer-scale roughness of Mars' surface: results from MOLA data analysis. *Journal of Geophysical Research*, 105, 26695-26712.
- Lepersonne, J. (1945). La Stratigraphie du Système du Kalahari et du Système du Karoo au Congo occidental. *Bulletin du Service Géologique du Congo belge et Ruanda-Urundi*, 1, 27-50.
- Lindenmaier, F., Miller, R., Fenner, J., Christelis, G., Dill, H. G., Himmelsbach, T., Kaufhold, S., Lohe, C., Quinger, M., Schildknecht, F., Symons, G., Walzer, A., & van Wyk, B. (2014). Structure and genesis of the Cubango Megafan in northern Namibia: implications for its hydrogeology. *Hydrogeology Journal*, 22, 1307-1328. doi: <https://doi.org/10.1007/s10040-014-1141-1>.
- Linol, B. (2013). Sedimentology and sequence stratigraphy of the Congo and Kalahari Basins of south-central Africa and their evolution during the formation and break-up of West Gondwana. PhD Thesis, Nelson Mandela Metropolitan University, 375 p.
- Linol, B., de Wit, M.J., Guillocheau, F., Robin, C., & Dauteuil, O. (2015). Multiphase Phanerozoic subsidence and uplift history recorded in the CB: A complex successor basin. In: de Wit, M., & Guillocheau, F. (eds), *The geology and resource potential of the Congo Basin*. Springer, Heidelberg. 417 p.
- Matmon, A., Hidy, A.J., Vainer, S., Crouvi, O., Fink, D., Erel, Y., Horwitz, L.K., & Chazan, M. (2015). New chronology for the southern Kalahari Group sediments with implications for sediment-cycle dynamics and early hominin occupation. *Quaternary Research*, 84, 118-132. doi: [10.1016/j.yqres.2015.04.009](https://doi.org/10.1016/j.yqres.2015.04.009)
- Mendelsohn, J., & el Obeid, S. (2004). *The Okavango River – The flow of a lifeline*. Struik Publishers, Cape Town, 176 p.
- Mendelsohn, J., Jarvis, A., & Robertson, T. (2013). *A profile and atlas of the Cuvelai – Etosha Basin*. Raison and Gondwana Collection, Namibia. 170 p.
- Miller, R.M.G. (1997). The Owambo Basin of northern Namibia. In: Selly, R. C. (ed.), *Sedimentary basins of the world: African basins*. Elsevier, Amsterdam, 237-268.
- Miller, R. McG. (2008). *The Geology of Namibia. Volume 3, Palaeozoic to Cenozoic*. Geological Survey of Namibia, Windhoek. ISBN: 0869767348.
- Miller, R. McG. (2010). *Lithology of Boreholes WW 201216 and WW 201217, Ohangwena region, Namibia*. Dept. of Water Affairs and Forestry, Windhoek, Namibia.

- Miller, R. McG. (2013). Groundwater for the North of Namibia: Technical Note no. 1—drill-log interpretation and evaluation of drillings KOH I and KOH II aquifers, Ohangwena Region, Cuvelai-Etosha Basin. BGR report 05-2345, DWAf, Windhoek, Namibia and BGR, Hanover, Germany.
- Miller, R. McG., Pickford, M., & Senut, B. (2010). The Geology, Palaeontology and Evolution of the Etosha Pan, Namibia: Implications for Terminal Kalahari Deposition. *South African Journal of Geology*, 113 (3), 307-334. doi: <https://doi.org/10.2113/Gssajg.113.3.307>.
- Miller, R. McG., Lohe, C., Hasiotis, S.T., Quinger, M. Mayumba, R. Joseph, R., & Nguno, A. (2016). The Kalahari Group in the 400-m deep core borehole WW 203302, northern Owambo Basin. *Communications of the Geological Survey of Namibia*, 17, 143-238.
- Miller, R. McG., Hasiotis, S.T., Lohe, C., Lindenmaier, F., & Quinger, M. (2023). An Investigation of Lithology, Hydrogeology, Bioturbation, and Pedogenesis in a Borehole through the Cubango Megafan, Northern Namibia. In: Wilkinson, M. J., and Gunnell, Y, (eds.), *Fluvial megafans on Earth and Mars: a significant mesoscale landform*, 287-307. <https://doi.org/10.1017/9781108525923.019>.
- Minty, B.R.S. (1997). Fundamentals of airborne gamma-ray spectrometry. *Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17(2), 39-50.
- Money, N.J. (1972). An outline of the geology of western Zambia. *Records of the Geological Survey, Republic of Zambia*, 12, 103-123.
- Omali, T.U. (2021). Utilization of Remote Sensing and GIS in Geology and Mining. *International Journal of Scientific Research in Multidisciplinary Studies*, 7, 17-24.
- Papp, E. (Ed.) (2002). *Geophysical and Remote Sensing Methods for Regolith Exploration*. CRC LEME open file report; 144, Bentley, WA, 115 p. ISBN: 0643068449.
- Passarge, S. (1904). *Die Kalahari. Versuch einer physisch-geographischen Darstellung der Sandfelder des südafrikanischen Beckens*. Dietrich Reimer: Berlin. 823 p.
- Pik, R., Marty, B., Carignan, J., Yirgu, G., & Ayalew, T. (2008). Timing of East African Rift development in southern Ethiopia: implication for mantle plume activity and evolution of topography. *Geology*, 36, 167-170.
- Polinard, E. (1947). *Considérations sur le Système du Kalahari et ses dérivés au sud du Congo Belge, entre le Kwango et le Katanga*. Institut Royal Colonial Belge. Section des Sciences Naturelles et Médicales. Mémoires. Collection in 8°. Tome XVIII. Fasc. 2, 55 p.
- Roberts, E., Jelsma, H.A., & Hegna, T. (2015). Mesozoic Sedimentary Cover Sequences of the Congo Basin in the Kasai Region, Democratic Republic of Congo. In: de Wit, M. J., Guillocheau, F., and de Wit, M. C. J. (eds.), *Geology and Resource Potential of the Congo Basin*, *Regional Geology Reviews*, Springer, 163–191.
- SACS (South Africa Committee for Stratigraphy) (1980). *Stratigraphy of South Africa. Part 1. Lithostratigraphy of the Republic of South Africa, South West Africa/Namibia and the Republics of Bophuthatswana, Transkei and Venda*. Handbook Geological Survey of South Africa, Pretoria, 690 p.
- Thomas, D.S.G., & Shaw, P.A. (1990). The deposition and development of the Kalahari Group sediments, Central Southern Africa. *Journal of African Earth Sciences (and the Middle East)*, 10, 187-197, [https://doi.org/10.1016/0899-5362\(90\)90054-I](https://doi.org/10.1016/0899-5362(90)90054-I).
- United States Geological Survey (USGS), 11/2019. *Landsat 8 (L8) Data Users Handbook*. LSDS-1574 version 5.0. <https://www.usgs.gov/media/files/landsat-8-data-users-handbook>.
- USGS (2019). *Landsat 8 Data Users Handbook*. Version 5.0. Doc. Num. LSDS-1574.
- Van der Meer, F.D., van der Werff, H.M.A., van Ruitenbeek, F.J.A., Hecker, C.A., Bakker, W.H., Noomen, M.F., van der Meijde, M., Carranza, E.J.M., de Smeth, J.B., & Woldai, T. (2012). Multi- and hyperspectral geologic remote sensing: A review. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 14 (1), 112-128. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2011.08.002>.
- Wallner, M., Houben, G., Lohe, C., Quinger, M., & Himmelsbach, T. (2017). Inverse modeling and uncertainty analysis of potential groundwater recharge to the confined semi-fossil Ohangwena II Aquifer, Namibia. *Hydrogeology Journal*, 25, 2303-2321.

- Wilford, J., & Creasey, J. (2002). Landsat Thematic Mapper. In: Papp, E. (ed.), Geophysical and remote sensing methods for regolith exploration, 6-12. CRC LEME Open File Report 14. <http://crcleme.org.au/>.
- Wilkinson, M.J. (2014). Rewriting the Landform History of One of Africa's Three Largest Basins. ARES Biennial Report 2012 Final, 103-105.
- Wilkinson, M.J., Kreslavsky, M.A., & Miller, R. McG. (2008). Megafans of the Northern Kalahari Basin. Third Southern Deserts Conference – Kalahari 2008 (University of Oxford, School of Geography), Molopo Lodge, Northern Cape, South Africa, 16–19 Sept 2008.
- Wilkinson, M.J., Miller, R. McG., Eckardt, F., & Kreslavsky, M.A. (2023). Megafans of the Northern Kalahari Basin (Angola, Botswana, Namibia, Zambia). In: Wilkinson, M. J. & Gunnell, Y. (Eds.), Fluvial megafans on Earth and Mars: a significant mesoscale landform. Cambridge University Press, Reino Unido, 48-77. <https://doi.org/10.1017/9781108525923.007>.