



METODOLOGÍA DE PROSPECCIÓN HIDROGEOLÓGICA Y PUESTA EN SERVICIO DE POZOS PERFORADOS CON BOMBA MANUAL. APLICACIÓN EN LA REGIÓN CRISTALINA DE CAIMBAMBO (BENGUELA, ANGOLA)

Miguel MARTÍN-LOECHES

Departamento de Geografía y Geología
Universidad de Alcalá
miguel.martin@uah.es

C. ALAMINOS

airrabi@yahoo.es

Jaime REYES

Instituto de Ingeniería
Universidad Autónoma de Baja California (México)
jaime.reyes63@uabc.edu.mx

Recibido: 14 de enero del 2015
Enviado a evaluar: 26 de enero del 2015
Aceptado: 15 de junio del 2015

RESUMEN

Se propone una metodología de trabajo para la prospección y puesta en servicio de pozos perforados de pequeño caudal y bombeo manual para poblaciones rurales dispersas y con menos de 1000 habitantes en zonas ígneo-metamórficas en la que priman los criterios económicos y la posibilidad de su utilización por los actores locales. El método se basa en el reconocimiento a través de imágenes de satélite de áreas geomorfológicas favorables al desarrollo de alteración del sustrato, su cartografía, el empleo de prospección geoelectrónica de resistividad 1D, la introducción de elementos sociales como la proximidad a las aldeas abastecidas, y la estimación del potencial de las perforaciones mediante técnicas de vaciado manual. Los procedimientos de prospección empleados, basados en técnicas de bajo coste en las que pueden implicarse los agentes locales, constituyen una situación intermedia entre la perforación en posiciones únicamente marcadas por conveniencia social, que tantos perjuicios económicos está ocasionando en las áreas rurales del África Subsahariana, y aquella guiada por el uso de las técnicas más sofisticadas y caras que con frecuencia resultan inviables. En este artículo se muestran los resultados de la aplicación de esta metodología en el municipio de Caimbambo (Angola), para que pueda ser utilizada y contrastada en otras regiones del mundo de características similares.

Palabras clave: Metodología de prospección de aguas subterráneas, África Subsahariana, zonas de alteración, rocas ígneo-metamórficas, pozos de bajo caudal, abastecimiento de agua.

HYDROGEOLOGICAL SURVEY METHODOLOGY AND SET WELLS DRILLED WITH A HAND PUMP. APPLICATION IN THE REGION CRYSTAL CAIMBAMBO (BENGUELA, ANGOLA)

ABSTRACT

A methodology based in both economical aspects and the possibility of its use for local technicians for prospection and putting in service boreholes of small yield and hand manual pumps for disperse rural populations of less than 1000 inhabitants is proposed. The methodology is based in the recognition through satellite images of geomorphological areas favorable to the development of weathered formation over the rocks, its cartography, the use of simple electrical resistivity surveys of 1D, the introduction of social aspects as the proximity to the villages, and the estimation of the potential of the wells through bailer manual procedures. Those proposed approaches based in low cost techniques occupy an intermediate position between the so bad resulting blind sitting procedures that have been apply profusely in Sub-Saharan Africa and those that follow the most sophisticated and expensive techniques that often are inoperant and unviable. In this paper the results obtained from the use of this methodology in Caimbambo area (Angola) are showed so that can be used and contrasted in other regions of the world with the same characteristics.

Keywords: Groundwater prospection approach, Sub-Saharan Africa, igneous-metamorphic rocks, weathered formations, low yield wells, water supply.

METHODOLOGIE DE L'ENQUETE HYDROGEOLOGIQUE ET LA MISE DE PUIITS FORES AVEC POMPE A MAIN. DEMANDE REGION DE CRISTAL CAIMBAMBO (BENGUELA, ANGOLA)

RÉSUMÉ

Une méthodologie pour la prospection et la mise en service de petits forages et débit de la pompe à main dispersés et moins de 1000 habitants dans les zones ignée-métamorphiques dans laquelle prévalent les critères économiques et la capacité des populations rurales utilisation est proposée par les acteurs locaux. La méthode est basée sur la reconnaissance grâce à l'imagerie par satellite favorable au développement des zones géomorphologiques de substrat altérée, sa cartographie, l'utilisation de la prospection géoélectrique résistivité 1D, l'introduction d'éléments sociaux tels que la proximité des villages fournis, et l'estimation de forage potentiel grâce à la vidange manuel technique. Les employés Enquête procédures, sur la base de techniques à faible coût qui peuvent engager les acteurs locaux, sont une situation intermédiaire entre les positions de forage seulement marquées par la désirabilité sociale, ce qui est à l'origine de nombreux dommages économiques dans les zones rurales de l'Afrique subsaharienne, et que guider l'utilisation des techniques les plus sophistiqués et coûteux qui sont souvent non viable. Dans cet article, les résultats de l'application de cette méthodologie dans la municipalité de Caimbambo (Angola), de sorte qu'il peut être utilisé et éprouvé dans d'autres régions ayant des caractéristiques similaires sont présentés.

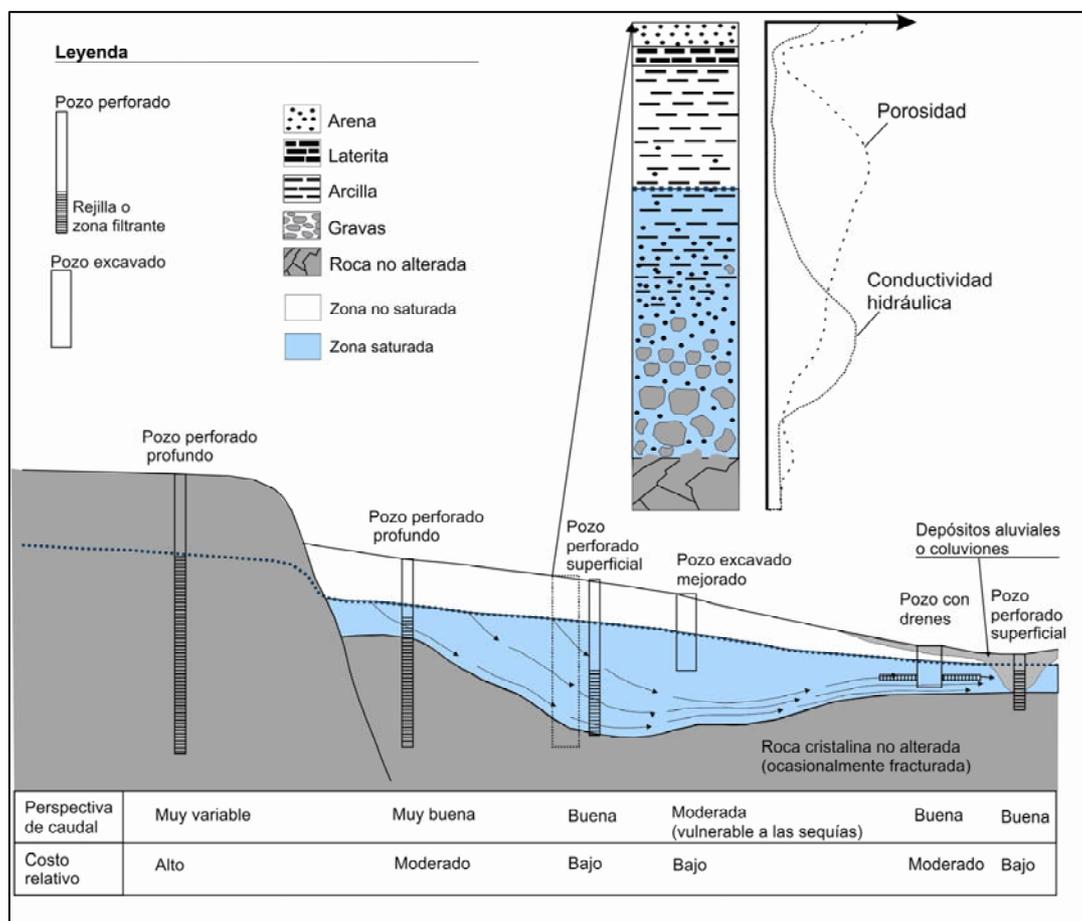
Mots-clés: Eaux souterraines exploration Méthodologie , Afrique sub-saharienne , des zones d'altération , des roches ignées et métamorphiques , les puits à faible débit , l'approvisionnement en eau .

1. INTRODUCCIÓN

Las aguas subterráneas son la principal fuente de abastecimiento de agua de la población rural del África Subsahariana, un territorio en el que el 40% de su superficie lo constituyen rocas ígneo-metamórficas de los escudos precámbricos del continente sobre las que viven 235 millones de personas en poblaciones rurales dispersas (MacDonald et al., 2008c).

En este tipo de ambientes geológicos existe agua subterránea en las zonas de alteración y/o fracturación, considerando que una combinación de ambas cosas es la situación ideal de cara a la ubicación de captaciones (Holland y Withüser, 2011). Las zonas de alteración pueden alcanzar normalmente 20-30 m de espesor, llegando en condiciones excepcionales hasta los 60 m (MacDonald et al., 2008a). Su parte más profunda es la más transmisiva ya que tiene menor contenido en arcillas y es donde se produce la mayor parte del flujo del agua, y la superior, más arcillosa, puede jugar un importante papel como reservorio de agua (Figura 1).

Figura 1. Corte esquemático de una región cristalina en el África Subsahariana¹.



Fuente: Foster et alii (2006).

¹ Corte esquemático de una región cristalina en el África Subsahariana con indicación de algunos de los tipos de captaciones posibles y su perspectiva de caudal frente a su coste (modificado de Foster et al., 2006). Se incluye un detalle de la composición típica de la zona de la alteración según Wright (1992).

Las fracturas, en zonas sin apenas alteración, pueden dar pozos de mayor caudal pero poseen una reducida capacidad de almacenamiento y son más difíciles de ubicar considerando la anisotropía del medio (Fashaeet al., 2014, Wright, 1995, Foster et al., 2006); los pozos que se perforan en las zonas de alteración y hasta la roca fresca poseen buenas perspectivas para mantener, al menos, una bomba manual (0.17 l/s) y bajo costo relativo (Fig. 1) (Foster et al., 2006) de forma que son los que se buscan de manera prioritaria en todas las campañas de perforación en contextos rurales sobre estos sustratos (Foster et al., 2006; Foster, 2012).

Estos acuíferos pueden recibir en función de su posición en el continente africano entre menos de 300 y más de 1400 mm de lluvia anual. Aunque no es el único factor, según Wright (1992) las precipitaciones son el elemento que domina sobre su recarga, que se estima entre el 10 y el 20 % de la lluvia allí donde ésta supera los 800 mm al año. Edmunds (1988) estima en 400 mm anuales de precipitación como el límite por debajo del cual la recarga es muy pequeña o inapreciable. No obstante, según MacDonald et al., (2008 b), el abastecimiento a las poblaciones rurales a través de captaciones equipadas con bombas manuales solo demanda una recarga de 10 mm al año.

En la fase inicial de cualquier estudio hidrogeológico en estos contextos, la cartografía geomorfológica en la que se señalen las áreas favorables al desarrollo de alteración superficial puede ser una herramienta muy útil (Dhakathe et al, 2008) que puede realizarse a través de la interpretación de fotografías aéreas o de imágenes de satélite directamente o con ayuda de un SIG (Fashae et al, 2014; Teeuw, 1995; Shahid et al., 2000; Singh y Prakash, 2002; Chuma et al, 2013; Talabi y Tijani, 2011; García-Rodríguez, et al., 2014). Posteriormente es importante evaluar el potencial de las zonas de alteración cartografiadas.

Existen varias técnicas geofísicas que pueden informar sobre el grado y la profundidad de la alteración del basamento. En la mayoría de las situaciones, las técnicas de resistividad eléctrica son *a priori* suficientes debido al contraste de resistividades entre el sustrato fresco y el alterado o fracturado. Según Barker (2004), la primera vez que se utilizó esta técnica en una zona de escudo en África con fines hidrogeológicos fue en 1933 en el actual Zimbabwe. Desde entonces se ha aplicado en muchos proyectos de abastecimiento sobre áreas cristalinas en el continente (Zohdy, 1974, Vouillamoz et al., 2002, ACF, 2001; Detay et al., 1989). La tomografía eléctrica 2D y 3D ofrece excelentes imágenes a partir de una gran cantidad de valores pero se necesita personal cualificado y equipos complejos y no resulta rentable ni eficiente en contextos de desarrollo. La resistividad 1D es una técnica económica y de fácil aplicación e interpretación y todavía hoy es el método más usado para abastecimiento rural en África e India (MacDonald et al, 2008b). En el uso de la geofísica existe no obstante una notable controversia; así, son numerosos los autores que indican que si se busca un caudal mínimo, suficiente para sostener una bomba manual (1 m³/hora), y concurren elementos geológicos y geomorfológicos indicativos de la existencia de un importante manto de alteración superficial, no es necesario el uso de técnicas geofísicas y bastaría con la opinión de un experto (Wurcel, 2001, MacDonald et al 2008b).

Sin embargo, cualquier tipo de bomba instalada, incluyendo las manuales, funcionará de manera más eficiente en pozos ubicados en aquellos puntos en cuya vertical la alteración se encuentre más desarrollada (Martín-Loeches y Rebollo, 2014) y si las condiciones económicas de la población mejoran con el tiempo se podría en ellos instalar una bomba de mayor caudal. Estas circunstancias son claras en favor del uso de la exploración geofísica también en proyectos que buscan un caudal mínimo, ya que ayudan a que las captaciones sean de mayor calidad y por tanto a la sostenibilidad de los proyectos a largo plazo. Es así como una vez localizada el área más favorable, en todos los casos es aconsejable en ella situar el punto más adecuado.

En relación a la localización final de un punto de agua no obstante, se debe tener presente que en estos contextos sociales, donde la población se desplaza hasta las captaciones, una ubicación no muy adecuada desde el punto de vista hidrogeológico, pero próxima a las viviendas, es preferible a posiciones alejadas. Se deben cumplir con unos parámetros mínimos de tiempo y de distancia (Bazew, 2011).

En 2008 los departamentos de Geofísica y Geología de la Universidad de Agostino Neto (UAN) de Luanda y el departamento de Geología de la Universidad de Alcalá (UAH) se responsabilizaron de la localización de los puntos más favorables para 20 perforaciones en el municipio de Caimbambo, situado en la provincia angolana de Benguela (Figura 2) en el marco del proyecto EuropeAid/122979/C/ACT/ACP Water Facility, de la Cruz Roja Española, a partir de procedimientos sencillos, fácilmente replicables. El contexto de dicha región se ajusta de manera estricta a las descripciones que hasta el momento se han señalado en esta introducción.

Con las captaciones se pretende abastecer con agua potable a poblaciones que recurren a fuentes alejadas y muy vulnerables a la contaminación bacteriológica por no encontrarse protegidas.

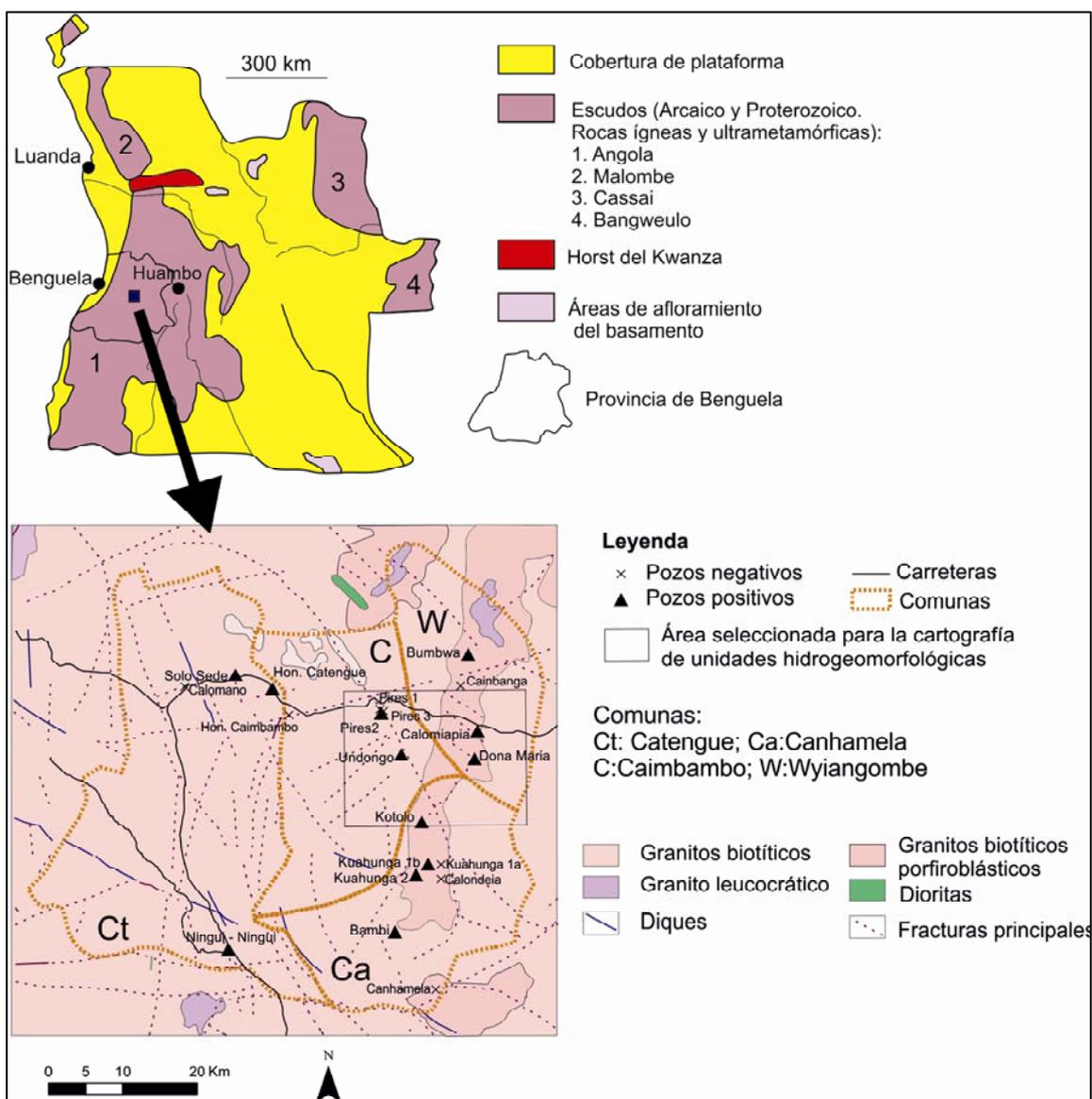
Este proyecto, por ser el primero de sus características en Caimbambo, ha supuesto una referencia para las nuevas perforaciones que se están realizando en el municipio en el marco del programa estatal "Agua Para Todos".

En este trabajo realizamos un análisis resumido de las fases que se han desarrollado durante los trabajos de prospección hidrogeológica y puesta en servicio de las captaciones en dicho proyecto. El procedimiento ha resultado satisfactorio y ha supuesto una reducción del gasto respecto a otras aproximaciones. Con su exposición pretendemos ofrecer una metodología apropiada, económica y sostenible para la localización de captaciones de pequeño caudal (1 m³/hora), en estos contextos geológicos, útil a los cuerpos técnicos estatales y municipales con responsabilidades en el abastecimiento de la población rural.

2. ÁREA DE ESTUDIO

El municipio de Caimbambo, de 3285 km² (Figura 2) se encuentra en el extremo occidental de la meseta Angolana o de Bié, unidad geográfica que por su elevación respecto del resto del territorio y su régimen de precipitaciones constituye el centro de dispersión de la red fluvial principal de Angola (Zerquera et al., 2008). La unidad geológica que conforma esta meseta es el denominado escudo de Angola, constituido por rocas ígneo-metamórficas de edad Precámbrico (ver Figura 2) notablemente fracturadas según varias direcciones preferenciales, fundamentalmente NNE-SSW, NNW-SSE, N-S y E-W (Miguel *et al.*, 2008).

Figura 2. Esquema geológico de Angola y del municipio de Caimbambo².



Fuente: Zerquera et alii (2008)

El escudo de Angola se eleva respecto a la costa a través de escalones sucesivos hasta altitudes superiores a 2000 m.s.n.m. El primero de estos escalones desde la costa se traduce en una cadena montañosa NO-SE que atraviesa el municipio de Caimbambo y lo divide en dos áreas; la occidental con alturas entre 600 y 700 m.s.n.m. y la oriental entre 800 y 900 m.s.n.m. donde son frecuentes montes de islas o inselberg que pueden superar los 1000 msnm (ver Figura 3).

² Esquema geológico de Angola y del municipio de Caimbambo con indicación de las 4 comunas que lo integran. Se incluye la geología básica de ING (1988), la localización de los pozos realizados días según Zerquera et al., (2008)

Figura 3. Cabecera del arroyo Caimbanga desde un punto situado entre Caimbanbo y Cubal.



Fuente: Elaboración propia.

La región de Caimbamba se encuentra en la zona de transición entre la costa árida de Benguela y el sector centro-oriental de Angola, notablemente más húmedo (Figura 2); así, se observa un aumento de las precipitaciones de occidente a oriente. En el extremo más occidental del municipio las precipitaciones medias anuales se aproximan a los 400-500 mm y en el extremo oriental -comunidades de Wyiangombe y Canhamela, ver Figura 2- supera los 1000 mm (WTP, 2007). No obstante el coeficiente de variación de la precipitación anual en el municipio es muy elevado, estimándose entre un 40 y un 60% (WTP, 2007) El clima es tropical seco con una estación seca (cacimbo) de mayo a octubre y una estación lluviosa de noviembre a abril. Las temperaturas pueden bajar hasta los 15 °C durante la estación seca aunque su promedio anual es de 22 °C. La región de Caimbamba, por estas características climáticas, se engloba en una zona seca subhúmeda.

3. METODOLOGÍA

3.1. FASES GENERALES DEL ESTUDIO

Planteamos un procedimiento de trabajo que incluye elementos clásicos de la prospección y de la apertura de puntos de agua en contextos geológicos parecidos que han sido adaptados para hacerlos más económicos y fácilmente aplicables por técnicos de cualificación media. De forma esquemática se resume en los siguientes puntos:

1. Realización de una cartografía de zonas geomorfológicas favorables a la infiltración y próximas a las aldeas y su reconocimiento *in situ* posterior para estimar de manera aproximada el grado de alteración y/o fracturación del sustrato. Algunas zonas interesantes podrían no tener entidad cartografiable.
2. Elección del área a explorar en detalle, junto con los técnicos locales.
3. Exploración geofísica de resistividad eléctrica en 1D del área seleccionada.
4. Perforación de las captaciones y evaluación de su capacidad para sostener una bomba manual para la población objetivo mediante sistemas de vaciado manual y registro de la recuperación del nivel del agua.

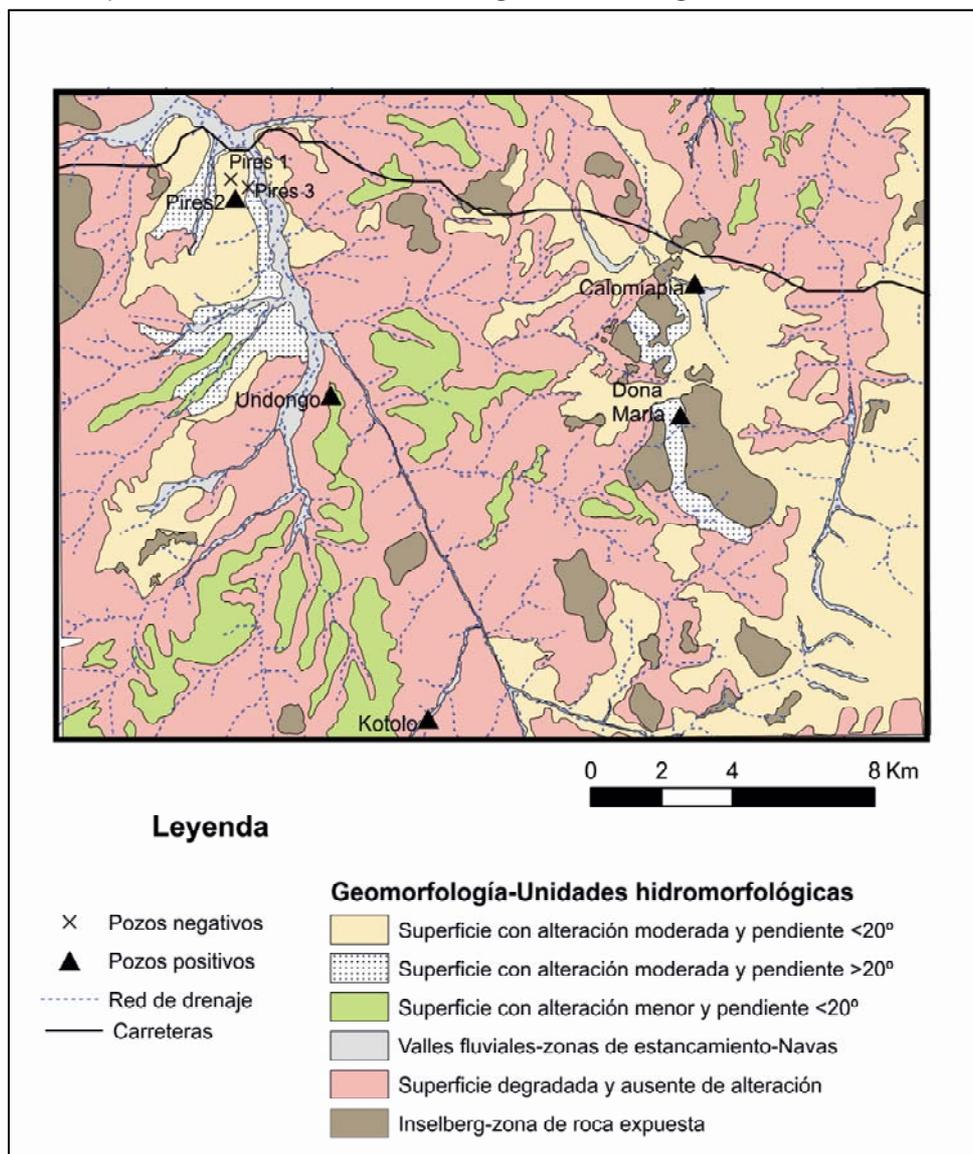
3.2. CARTOGRAFÍA GEOMORFOLÓGICA

La geomorfología juega un importante papel en la distribución de las áreas potencialmente productivas en este tipo de ambientes geológicos (Holland y Withüser, 2011, MacDonald et al., 2008; Thornburry, 1969; Ratnakar Dhakate et al., 2008). El objetivo es localizar aquellas zonas morfológicas que potencialmente pueden ser indicativas de la existencia de alteración en el sustrato que a su vez albergan aguas subterráneas si reciben precipitaciones suficientes.

Se han reconocido varias unidades hidromorfológicas y se han clasificado en función de su potencial a desarrollar una zona de alteración más o menos importante, reconocible por su pendiente (más favorable por debajo de 20°), la ausencia de afloramientos rocosos y las precipitaciones recibidas; en muchos casos dicho desarrollo se ha verificado y contrastado con visitas al terreno y la prospección geofísica. La convergencia de las superficies favorables con lineamientos es ideal pero no ha constituido un objetivo prioritario de este trabajo. No obstante se deben incluir en la cartografía las fracturas más importantes.

Para servir de ejemplo se expone en la Figura 4 la cartografía geomorfológica de un área de 420 km² dentro de la franja de precipitaciones anuales superiores a los 800 mm seleccionada por ser aquella en la que mayor variación de unidades existe y mayor también el número de datos.

Figura 4. Mapa de unidades hidromorfológicas de la región seleccionada³.



Fuente: Zerquera et alii (2008).

3.3. SELECCIÓN DE LA ZONA MÁS FAVORABLE

En la elección de la zona a explorar con más detalle, que se realizaba *in situ* en compañía de las autoridades y técnicos locales, se descartaban como zonas de interés las áreas próximas a las corrientes fluviales por el riesgo de entrada a la futura captación de aguas superficiales en casos de avenida o arroyada y se tuvieron en cuenta las actividades potencialmente contaminantes presentes y futuras.

Se descartaron igualmente las zonas que supusieran una distancia superior a 500 metros de cualquier vivienda de la población a abastecer (Bazezew, 2011).

³ Como ejemplo y marcada en la Figura 2.

3.4. PROSPECCIÓN GEOELÉCTRICA

En estos contextos defendemos el uso de la resistividad eléctrica en una dimensión (1D) por las razones ya comentadas en la introducción. El contraste de resistividades entre el material alterado y el fresco es muy notable lo que hace de esta técnica una opción suficiente. El método consiste en aplicar corriente eléctrica al terreno a través de dos electrodos (A y B) cuya intensidad (I) es registrada, y y medir la diferencia de potencial resultante (dV) a través de otros dos electrodos (M y N) (Figura 5).

La resistividad aparente (ρ_a) del subsuelo a una profundidad semejante a la distancia AB, y para el dispositivo Schlumberger, el más utilizado y en el que los electrodos se disponen simétricamente desde el punto central, se expresa como

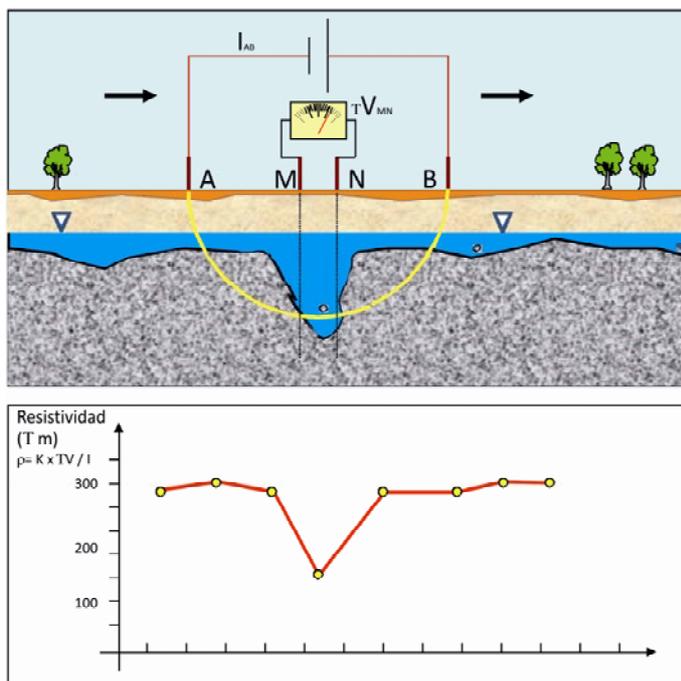
$$\rho_a = G \frac{(\Delta V)}{I}$$

Donde G es un factor que depende de la geometría del dispositivo.

En los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) el punto central del dispositivo permanece fijo mientras la distancia entre los electrodos de corriente AB se va incrementando para obtener información sobre secciones más profundas. En los perfiles o calicatas eléctricas el espacio entre electrodos es fijo y el dispositivo entero se desplaza a lo largo de una línea recta, lo que da información de los cambios laterales de resistividad a una profundidad aproximada.

El procedimiento comúnmente empleado en estos contextos hidrogeológicos y en ausencia de equipamientos en 2D, consiste en localizar en un área determinada el punto de menor resistividad para una profundidad aproximada a través de calicatas eléctricas (Figura 5) y allí realizar un Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) para definir las características de los materiales en profundidad (Vouillamoz et al., 2000).

Figura 5. Esquema de una calicata eléctrica 1D.



Se ha utilizado en todos los casos el dispositivo Schlumberger con AB/2 de 10, 15 y 30 m en las calicatas y de 200 m de apertura máxima en los SEV. Las curvas SEV (AB/2 frente a P_a) se interpretan a través de su comparación con curvas maestras de dos, tres o cuatro capas (Orellana y Mooney, 1966).

3.5. PERFORACIÓN DE CAPTACIONES Y AFOROS

Las perforaciones se realizaron con una máquina de circulación directa de lodos que podía trabajar en rotación y en rotopercusión a un diámetro de 140 mm.

El caudal de las captaciones se estimó durante el desarrollo que se realizó a través de la introducción de aire comprimido (desarrollo neumático o airlift); esta práctica provoca el desalojo del agua del sondeo que puede medirse en superficie. Ya que esta medida del caudal se realiza durante el proceso de estimulación del pozo, se admite que no es muy precisa; además no se mide el descenso del nivel del agua durante el proceso y por tanto se desconoce la eficiencia de la captación para mantener un determinado caudal (MacDonld et al , 2008b). Es recomendable la realización de pruebas de bombeo escalonadas para obtener la ecuación de los descensos de cada captación y su eficiencia para determinados caudales de extracción, pero su gasto en combustible y tiempo es muy elevado.

Teniendo en cuenta la precaria situación del abastecimiento de agua de la población decidimos realizar en los pozos con menor caudal pruebas "bailer" según han sido diseñadas por MacDonald et al. (2008a) para comprobar si podrían soportar la instalación de una bomba manual. Estas pruebas consisten en el vaciado manual mediante cazoletas metálicas del agua del pozo durante 10 minutos (Figura 6) y la observación de la recuperación del nivel. Son válidas únicamente para profundidades del agua menores de 15-20 m y en acuíferos de baja transmisividad, entre 0.1 y 50 m² d-1.

Figura 6. Realización de una prueba "bailer" en Undongo.



Fuente: Elaboración propia.

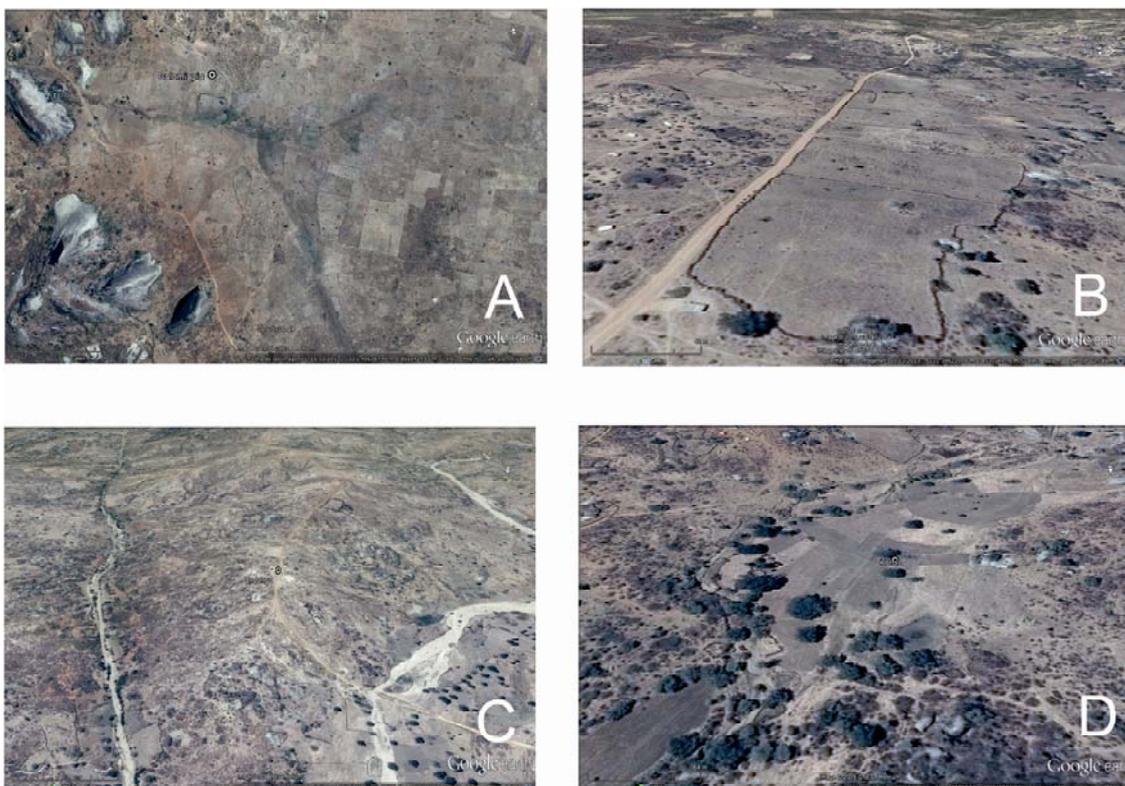
4. RESULTADOS

4.1. ÁREAS GEOMORFOLÓGICAS O UNIDADES HIDROMORFOLÓGICAS

Las unidades geomorfológicas o hidromorfológicas que fueron reconocidas fueron las siguientes (ver figura 4):

1. Superficies del pedimento con alteración moderada y pendiente inferior a 20°. Estas formas se observan en una gran parte de la superficie de estudio. Tienen pendientes suaves y una alteración que puede superar los 20-30 metros, según se puede interpretar de las curvas SEV tomadas en algunas de ellas y del resultado de las perforaciones. Las perspectivas para el agua subterránea son altas en la práctica totalidad de su superficie y muy altas a lo largo de fracturas o lineamientos. Los suelos son arenosos con una gran intensidad de lavado, lo que asociamos con un proceso prolongado de alteración (Foster 1997 y 2012). Su desarrollo en zonas de precipitaciones inferiores a los 400 mm puede ser importante pero las perspectivas hidrogeológicas son menores. Las que se desarrollan en la región más lluviosa de Caimbambo ofrecen muy buenas perspectivas; el ejemplo más significativo en la región es Calomiapia (Figura 7A) y Dona Maria.

Figura 7. Ejemplos de algunas áreas hidromorfológicas.



Fuente: Google earth.

2. Superficies del pedimento con alteración moderada y pendiente superior a 20°. Son regiones que se localizan en las laderas de elevaciones de morfología suave. Poseen pendientes algo más pronunciadas que en la unidad anterior y la alteración oscila entre 10 y 15 metros. Las zonas con mayores perspectivas hidrogeológicas se sitúan en las partes medias y bajas de su superficie, donde la alteración es mayor. Como ejemplo presentamos Cuanhua 1 (Figura 7B), Bumbua y Pires.
3. Superficies del pedimento con alteración menor y pendiente inferior a 20%. Son superficies que constituyen zonas de cierto potencial pero donde la alteración se encuentra en claro retroceso de su espesor inicial por procesos de erosión. Puede en todo caso tener un espesor medio de entre 10 y 15 m. Son zonas muy extendidas en la región y donde habita un importante número de personas. Ha resultado en ocasiones un lugar productivo. Mantiene una morfología favorable a la infiltración. Presentamos Undongo como ejemplo (Figura 7C).
4. Valles fluviales. Se presentan allí donde existen corrientes de agua de cierta importancia. Son zonas muy planas. Constituyen rellenos aluviales de diferente naturaleza. Se encuentran secos durante gran parte del año. Las perspectivas en estas zonas son muy altas pero se debe extremar el cuidado en la posición de las captaciones por razones de seguridad sanitaria. Incluimos en esta unidad a las zonas de estancamiento tipo nava, que son frecuentes en las áreas donde la escorrentía se encuentra poco definida. Los ejemplos más claros son Kotolo (Figura 7D) y Ningui – Ningui.
5. Superficies erosionadas o zonas de erosión. Corresponden con las áreas en las que se está produciendo erosión de forma activa, con incisión de las corrientes fluviales; poseen pendientes superiores a los 20 ° y son frecuentes los afloramientos rocosos. Los suelos y la alteración aparecen irregularmente distribuidos. Las perspectivas para el agua subterránea son pequeñas pero pueden albergar pozos positivos entre los bloques rocosos o en determinados puntos donde se observe la posibilidad de un flujo preferente.
6. Montes islas, panes de azúcar, zonas extensas de afloramiento rocoso. Son zonas donde las perspectivas para el agua subterránea son muy pobres o inexistentes.

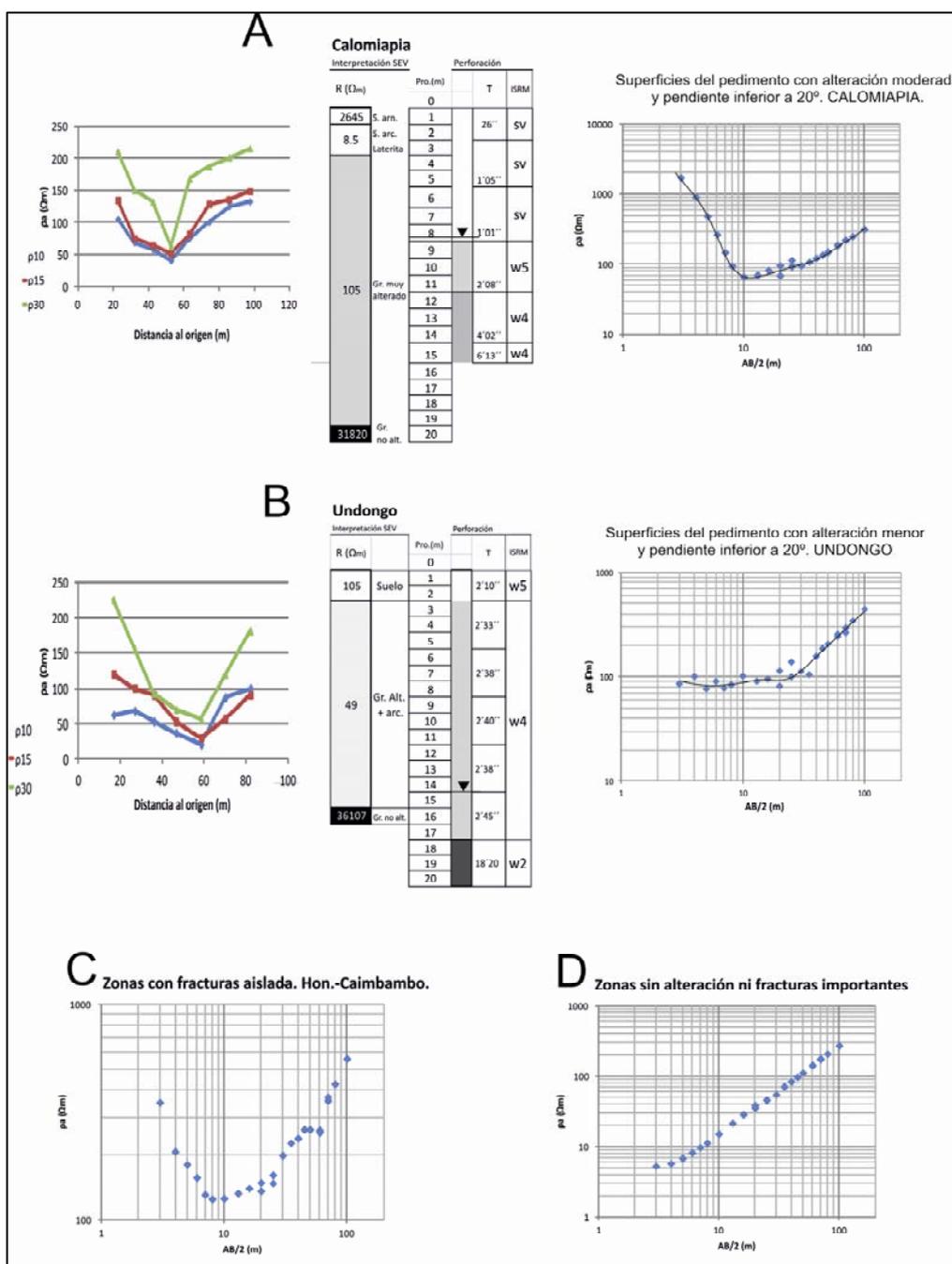
Aunque no han sido cartografiadas en ningún sector del área de estudio, las superficies sin alteración pero con fracturas importantes, desde el punto de vista del agua subterránea son importantes si no existe otra posibilidad. Las perforaciones en estas zonas son más difíciles y de hecho 2 intentos en ellas (Pires 1 y Ondio-Caimbambo) fueron infructuosos.

4.2. PROSPECCIÓN ELÉCTRICA

La prospección eléctrica se realizaba en las zonas que previamente habían sido seleccionadas de entre las cartografiadas. Ya que en cada una se buscaba mediante perfiles eléctricos el punto en cuya vertical el espesor de alteración era mayor, no obtuvimos curvas SEV características de las zonas seleccionadas. Quiere esto decir que en zonas donde la alteración es menor, inferior en promedio a 10 metros, se podrían obtener resultados notablemente superiores.

En la Figura 8 se muestran las curvas SEV en cuatro puntos distintos que pertenecen a 4 diferentes zonas hidromorfológicas; en los dos primeros casos (A y B) se incluye el resultado de la calicata eléctrica que sirvió para situar el SEV así como la interpretación de dicho SEV y la columna litológica del pozo que se realizó en ese punto.

Figura 8. Calicata eléctrica y SEV en Calomiapia y Undongo⁴.



⁴ Calicata eléctrica y SEV en Calomiapia y Undongo (A y B), con resultado de la interpretación y de la perforación en ambos casos. La escala ISRM (ISRM, 1978) hace referencia al grado de alteración (w) con un número del 1 al 5 siendo 1 el granito fresco y 5 el granito muy alterado. Se incluyen en las áreas con fracturación y sin alteración (C) y las áreas sin alteración ni fracturación (D)

La asignación de litologías a cada resistividad se realiza por comparación con la experiencia adquirida y que resumimos en la Tabla 1.

Tabla 1. Rango de resistividades encontradas en el entorno de la zona de estudio.

Material	Resistividad ($\Omega.m$)
Suelo superior arcilloso-arenoso	60-150
Suelo superior arenoso	1500-2000
Arcillas secas	10-80
Lateritas	100-150
Granito alterado	50-250
Granito alterado con arcilla	15-150
Granito no alterado	>2000

Fuente: Elaboración propia.

Casi todas las curvas SEV obtenidas son de tres capas, con forma de U. En general, mientras más abierta sea la U, mayor espesor de alteración; el tramo descendente de la curva comenzará a una altura que vendrá determinada por la naturaleza del suelo en los primeros metros. Si el tramo ascendente de la curva tiene una pendiente muy pronunciada es señal de que el sustrato se encuentra fresco a partir de una profundidad que puede estimarse por el comienzo de dicho tramo ascendente.

La curva SEV obtenida en Calomiapia (Figura 8A) refleja un espesor importante de granito alterado y casa relativamente bien con el resultado de la perforación. Como hemos comentado, en las áreas donde se encuentra este punto (superficies del pedimento con alteración moderada y pendiente inferior a 20°) las perspectivas hidrogeológicas son buenas y el uso de las técnicas geofísicas se justifican en aras de la sostenibilidad de las infraestructuras ya que permiten localizar un punto en cuya vertical las perforaciones funcionarán de una forma más eficiente y/o podríamos obtener en ellas caudales superiores. Esto es lo que se cumple en Calomiapia gracias a su ubicación por la calicata Fig 8 A). En un contexto de emergencia humanitaria el uso de la prospección eléctrica sería innecesario en estas zonas.

En las superficies del pedimento con alteración menor y pendiente inferior a 20° (Bumbua y Undongo, Figura 8B) es importante el uso de las técnicas geoelectricas para localizar en su superficie el punto donde se desarrolla más alteración por la presencia de una fractura singular; hemos de recordar que son áreas expuestas a la erosión cuya zona de alteración original ha podido disminuir de espesor. Se ha observado gracias a las calicatas realizadas en Bumbua y Undongo (Figura 8B) que dichos puntos son claramente reconocibles. En ellos la alteración puede alcanzar hasta 19 metros.

En las superficies del pedimento con alteración moderada y pendiente superior a 20° los resultados no son concluyentes. Las perforaciones que se situaron en estos dominios a través de la geofísica, fueron improductivas ya que se encontraban en áreas de escasa recarga y no se perforó más allá de 40 metros. Tal vez se hubieran conseguido resultados a mayor profundidad. En el barrio de Pires y en Cuangua 2 se localizaron dos puntos sin procedimientos geofísicos productivos únicamente considerando aspectos morfológicos y de lejanía a afloramientos rocosos en superficie.

En los valles fluviales la resistividad eléctrica se justifica para realizar estimaciones de profundidad del sedimento.

En las superficies sin alteración y con fracturas, la única posibilidad es localizar fracturas abiertas en profundidad. La región de Hondio–Caimbambo y la parte culminante del barrio de Pires en Caimbambo Sede se sitúan en estas zonas. Son áreas muy pobladas donde la necesidad de agua es extremadamente acuciante. Desde el punto de vista de la hidrogeología se sitúan ambas en posiciones muy desfavorables ya que se encuentran en los talweg de las cuencas fluviales. Las calcatas eléctricas efectuadas localizaron en ambos casos un punto de cierto interés y en los SEV se localizó una disminución de la resistividad en el tramo de la curva ascendente (ver Figura 8C) que interpretamos como fracturas que podrían ser productivas (Ballukraya et al, 1983, Sánchez San Román 1985 y 1987). Las perforaciones alcanzaron las profundidades estimadas de esas supuestas fracturas (50 y 41 m, Tabla 2), pero los resultados fueron negativos. No compensa en estos casos el uso de las técnicas eléctricas 1D ya que no son precisas y se justificaría el uso de una técnica de mayor precisión. No obstante en estas posiciones sería muy difícil que el agua en las fracturas, de existir, subiera hasta una posición tal que permitiera un uso adecuado de una bomba manual, ya que la mayoría son eficientes sólo hasta 35 m de elevación (Baumann, 2000). Se debe buscar otra fuente alternativa de agua para estas poblaciones.

4.3. PERFORACIÓN DE LAS CAPTACIONES Y PRUEBAS DE AFORO

Se realizaron 20 perforaciones de las cuales resultaron positivas 12 (Figura 2 y Tabla 2), lo que eleva al 60 % el porcentaje de éxito alcanzado (Tabla 2). Para estos contextos geológicos en África se han obtenido resultados semejantes en distintas campañas de perforación en las que se han utilizado distintos métodos de exploración hidrogeológica (Wright, 1992).

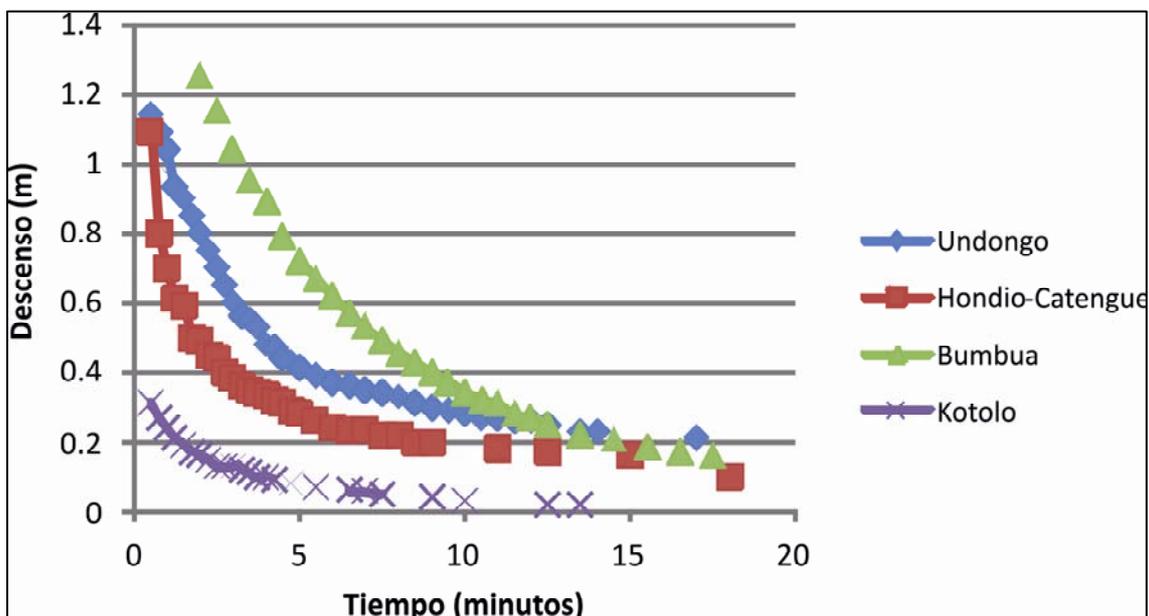
Tabla 2. Características básicas de las perforaciones positivas y negativas.

	Lugar	Zona geomor.	Prof. Pozo (m)	Prof. RNA real (tiempo perforación último tramo)	Presencia fracturas en RNA según sev (m)	Prof. agua (m)	Caudal Air Lift (l/h)	Comentario	Caudal (l/s)	Caudal (l/min)
Positivos: 60 %	Bambi	2	29	20 (16')	No	19	1000	CS BM	0.28	16.67
	Bumbwa	3	35	No llegó (5'35'')	No	22	200	Bailer	0.06	3.33
	Calomiapia	1	17	No Llegó (6'13'')	No	11	2000	CS BM	0.56	33.33
	Dona Maria	2	32	NO Llegó (5'50'')	Sí (35)	19	2000	CS BM	0.56	33.33
	Hondio-Catengue	5	20	No llegó (8'48'')	Sí (30)	12	800	Bailer	0.22	13.33
	Kotolo	4	14	14 (19'20'')	No	10	1500	CS BM	0.42	25
	Cuahunga 1b	2	24	24 (12'48'')	8	7000	CS BM	1.94	116.7
	Cuahunga 2	2	32	No llegó (4'42'')	no	20	2000	CS BM	0.56	33.33
	Ningui-Ningui	2	14	14 (18'40'')	Sí (25)	10	1500	CS BM	0.42	25
	Pires 2	2	37	No llegó (9'37'')	10	1800	CS BM	0.5	30
	Solo Sede	4	17	17 (15'13'')	No	12	1000	CS BM	0.28	16.67
	Undongo	3	20	20 (18'20'')	No	17	100	Bailer	0.03	1.67
Negativos: 40 %	Caimbanga	5	15	No llegó (2'54'')	No			CS BM Caudal suficiente para bomba manual		
	Calomano	2	17	No llegó (8'31'')	No			RNA Roca No Alterada		
	Calundeia-Caleva	5	11	6 (17'40'')	No			Zona geomorfológica:		
	Canhamela	1	13	4(17')	35-45			1. Superficies del pedimento con alteración moderada y pendiente inferior a 20°		
	Hondio-Caimbambo	3	50	38 (10')	50			2. Superficies del pedimento con alteración moderada y pendiente superior a 20°		
	Cuahunga 1a	3	14	No llegó (7'15'')	No			3. Superficies del pedimento con alteración menor y pendiente inferior a 20°		
	Pires 1	3	41	0 (9'13'')	40			4. Valles fluviales		
Pires 3	2	30	No llegó (15'50'')	No			5. Superficies erosionadas o zonas de erosión			
							6. Montes islas, panes de azúcar, zonas extensas de afloramiento rocoso			

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de los aforos con air-lift pueden verse en la Tabla 2. Se admite a un pozo como positivo, si se superan los 800 o los 1000 litros/hora (0.22-0.27 l/s) (Wurzel, 2001, Danert et al, 2009, RWSN, 2010), que es el caudal que normalmente puede aportar una bomba manual (Baumann, 2000).

Figura 9. Pruebas "bailer" efectuadas⁵.



Fuente: Elaboración propia.

En tres de los pozos perforados positivos los registros air-lift eran inferiores a estos caudales límite, aunque mantenían un flujo continuo de salida. Realizamos en ellos pruebas "bailer" según han sido diseñadas por MacDonald et al. (2008a) para comprobar si podrían soportar la instalación de una bomba manual y un régimen de uso ajustado a 20 L/persona y día. En los tres pozos probados los resultados fueron positivos (Figura 9) lo que apoyó la decisión de la instalación en ellos de la bomba.

5. CONCLUSIONES

Tras la aplicación de las fases de exploración, consistentes en la localización de las áreas geomorfológicas favorables próximas a las comunidades y el uso en ellas de las técnicas geofísicas de resistividad eléctrica, podemos concluir los siguientes puntos:

1. La cartografía de zonas geomorfológicamente favorables al desarrollo de alteración del sustrato debe ser completada *in situ* con el reconocimiento de las mismas por un experto y con datos procedentes de la exploración geofísica. La cartografía no será suficiente hasta que no haya otros datos que apoyen las evidencias de la presencia de alteración.

⁵ Pruebas "bailer" efectuadas en los tres pozos donde se registró un caudal air-lift menor de 800 L/h. Se incluye Kotolo, con caudal air-lift muy superior, para que sirva de contraste con el resto de las curvas

2. En la cartografía geomorfológica es interesante incluir los lineamientos estructurales ya que en su convergencia con las zonas de alteración pueden resultar en zonas de máxima factibilidad; sin embargo este hecho no excluye la exploración geofísica, ya que aporta mayor precisión.
3. El interés de las zonas de alteración está condicionado por la recarga. En zonas con una precipitación inferior a los 500 mm anuales las perforaciones han sido infructuosas.
4. En la selección de la zona más adecuada para explorar, los factores sociales son importantes. En el abastecimiento a poblaciones rurales dispersas con pozos equipados con bomba manual debe primar el factor social y el de cercanía a la fuente de agua. Este hecho reduce el interés de la localización de las grandes fracturas como objetivo frente a la alteración del sustrato de presencia mucho más frecuente; por un lado las fracturas importantes marcan la red de drenaje superficial con aguas contaminadas y por otro la localización de puntos de interés en fracturas es más costoso y supone un esfuerzo sobredimensionado para los caudales buscados.
5. La exploración geofísica a través de la resistividad eléctrica ha ayudado a localizar el punto más favorable para perforar, especialmente en las zonas geomorfológicas más complejas. No se ha comprobado su eficacia en zonas de precipitación escasa, ya que las perforaciones no superaban normalmente los 40 metros de profundidad. La geofísica aplicada no ha resultado adecuada para estimar con precisión la posición de fracturas o la profundidad total de la zona alterada pero sí para localizar dónde las perforaciones trabajarían de manera más eficiente.
6. Aun no siendo necesario el uso de técnicas geofísicas de exploración para asegurar un pozo en una zona favorable, sí estimamos que lo es para localizar el punto donde la captación funcionará mejor.

En cuanto a la puesta en servicio de las captaciones, se ha comprobado que las pruebas "bailer" según han sido diseñadas por MacDonald et al. (2008) son suficientemente significativas para conocer el potencial de un pozo para soportar una bomba manual y un número limitado de usuarios, pero no son adecuadas para establecer la eficiencia en pozos con caudales mayores. Las pruebas bailer sólo se aconsejan en pozos donde el caudal estimado con procedimientos estándar haya resultado inferior a 800 l/h.

La metodología desarrollada no difiere mucho de las clásicas utilizadas en las campañas de perforación de las grandes agencias humanitarias (ACH, 2005) pero propone en alguno de sus puntos el uso de alternativas económicas a los procedimientos normalmente utilizados. Por ejemplo la fotografía aérea disponible en internet es suficiente para realizar una cartografía previa, la resistividad puede evaluarse a partir del uso de un resistímetro simple y las captaciones evaluarse con dos cubos estrechos metálicos y un limnómetro de construcción sencilla.

Es importante subrayar dos puntos en relación a la metodología expuesta en este trabajo. Son los siguientes:

1. Es una metodología válida únicamente para el caso de perforaciones en las que se instalará bomba manual.
2. Es necesaria la opinión y supervisión de un experto en todas sus fases.

Tras esta experiencia de trabajo, creemos de interés potenciar que los cuadros técnicos de la Dirección Provincial del Agua de Benguela e incluso los municipales de Caimbambo posean un equipamiento y una formación ajustadas a estos resultados; pensamos que de esta manera se pueden afrontar con garantías los procedimientos de ubicación y puesta en servicio de las perforaciones previstas en el municipio y en otras regiones graníticas del país.

6. BIBLIOGRAFÍA

- ACF (2005) Water, sanitation and hygiene for populations at risk. ACF. HERMANN.
- ARGOSS (2001) Guidelines for Assessing the Risk to Groundwater from On-Site Sanitation. British Geological Survey Commissioned Report CR/01/142. En <http://www.bgs.ac.uk>
- Ballukraya, P.N.; R. Sakthivadivel y R. Baratan (1983). *Breaks in Resistivity Sounding Curves as Indicators of Hard Rock Aquifers*. *Nordic Hydrology*, 14: 33-40.
- Barker, R. 2004 The first use of geophysics in borehole siting in hardrock areas of Africa. in Mather, J.D. (ed.) *200 Years of British Hydrogeology*. Geological Society, London, Special Publications, 225, 263-269.
- Baumann, E. (2000). *Water lifting*. SKAT, Swiss Centre for Development Cooperation in Technology and Management. St. Gallen, Suiza.
- Bazewez, N. (2011) *Abastecimiento de agua, saneamiento y promoción de la higiene*. En Carta humanitaria y normas mínimas para la respuesta humanitaria. Proyecto Esfera. Practical Action Publishing. UK.
- Catanha, M., da Silva, O., Francisco Fiel, P., Torres T., Gallardo, J., Martín-Loeches, M., Luís Miguel, G., de Andrade, H., y Alaminos, C., (2009) *Relatório sobre os trabalhos de geofísica realizados nas comunas de Catengue, Caimbambo, Kanhamela e Wyiangombe pertencentes ao Município de Caimbambo, Província de Benguela. Cruz Vermelha de Angola. Projecto águas de Caimbambo – Benguela*. Departamentos de Geologia e Geofísica. Faculdade de Ciências. Universidade Agostinho Neto. Informe interno.
- Chilton, P.J. y Foster, S. (1995). Hydrogeological characterization and water-supply potential in basement aquifers in tropical Africa. *Hydrogeology Journal*, V. 3. No.1.
- Chuma, C., Orimoogunje, O. I. O., Hlatywayo, D. J., & Akinyede, O. J. (2013). Application of Remote Sensing and Geographical Information Systems in Determining the Groundwater Potential in the Crystalline Basement of Bulawayo Metropolitan Area, Zimbabwe. *Scientific Research, Advances in Remote Sensing Journal*, 2, 149-1613. <http://dx.doi.org/10.4236/ars>.
- Danert, K., Armstrong, T., Adekile, D., Duffau, B., Ouedraogo, I. y Kwei, C. (2010) Code of Practice for Cost Effective Boreholes. Rural Water and Sanitation Network. SKAT, 2010.
- Darnet, K., Carter, R.C., Adekile, D. e MacDonald, A. (2009). Cost-Effective boreholes in sub-Saharan Africa. 33rd WEDC International Conference, Accra, Ghana. Em: <http://www.rural-water-supply.net/en/resources/details/145>.
- Detay, M., Poyet, P., Emsellem, Y., Bernardi, A. & Aubrac, G. (1989) Development of the saprolite reservoir and its state of saturation: influence on the hydrodynamic characteristics of drillings in crystalline basement (in French). *C. R. Acad. Sci. Paris Série II* 309, 429–436.
- Fashae, O.A., et al. (2014) Delineation of Groundwater potential zones in the crystalline basement terrain of SW-Nigeria: an integrated GIS and remote sensing approach. *Applied Water Science* 4, 19–38.
- Foster, S. (1984). African groundwater development – the challenges for hydrogeological science. *Challenges in African Hydrology and Water Resources* (Proceedings of the Harare symposium, July 1994), IAHS Publication 144.
- Foster, S. (2012). Hard-rock aquifers in tropical regions: using science to inform development and management policy. *Hydrogeology Journal*, 20: 659-672.

- Foster, S., Tuinhof, A. y Garduño, H. (2006) Groundwater Development in Sub-Saharan Africa. A Strategic Overview of Key Issues and Major Needs. Sustainable Groundwater Management. Lessons from Practice 2006.
- García-Rodríguez, M., Loreto Anton, L. y Martínez-Santos, P., (2014). Estimating groundwater resources in remote desert environments by coupling geographic information systems with groundwater modeling (Erg Chebbi, Morocco). *Journal of Arid Environments* 110 (2014) 19e29.
- Holland, M., Withüser, K.T., (2011). Evaluation of geologic and geomorphologic influences of borehole productivity in crystalline bedrock aquifers of Limpopo Province, South Africa. *Hydrogeology Journal* 19, 1065-1083.
- ING (1988). Carta geológica de Angola 1: 1000000. Instituto Nacional de Geología del Ministerio de Industria de Angola.
- ISRM, (1978). International society of rock mechanics 1978. Methods for the quantitative description of rock masses and discontinuities. *Int. J. Rock Mech. Miner. Sci. Geomech. Abstr.* 15, 319 – 368.
- MacDonald, A., Baker, J.A., y Davis, J. (2008a) The bailer test: a simple effective pumping test for assessing borehole success. *Hydrogeology Journal* 16: 1065-1075.
- MacDonald, A., Davies, J., Calow, R. y Chilton, J. (2008b) *Developing Groundwater. Practical Action Publishing.*
- MacDonald, Alan; Davies, Jeffrey; Callow, Roger C. (2008). African hydrogeology and rural water supply. In: Adelana, Segun; MacDonald, Alan, (eds.) *Applied groundwater studies in Africa.* Leiden, the Netherlands, CRC Press, 127-148. (IAH selected papers on hydrogeology, 13).
- Martín-Loeches, M. (2009) Informe estancia proyecto Caimbambo del 28 de noviembre al 11 de diciembre de 2009. Informe interno. CRE.
- Martín-Loeches, M. y Rebollo, L. (2008) Informe sobre la visita efectuada del 21 de noviembre al 6 de diciembre de 2008 al área del proyecto de CRE "Fortalecimiento de las estructuras de agua y saneamiento en el municipio de Caimbambo, provincia de Benguela (Angola)". CRE, Informe Interno.
- Martín-Loeches, M. y Rebollo, L.F. (2014a) Factores hidrológicos, hidrogeológicos y ambientales con influencia en la elección y eficiencia en el funcionamiento de las bombas manuales. *DisTecD. Diseño y Tecnología para el Desarrollo*, 1: 147 -157. Disponible en <http://polired.upm.es/index.php/distecd/article/view/2506>.
- Miguel, G., De Andrade e Sousa, H., Alaminos, C., Fiel, P. y Gallardo, J. (2008). Relatorio hidrogeológico preliminar sobre a área de Caimbambo. Informe interno UAN-CR.
- Orellena E, Mooney HM (1966) Master tables and curves for vertical electrical sounding over layered structures. *Interciencia*, Madrid.
- ORION y C&C (2008). Angola. Catálogo oficial del pabellón de Angola en la Expo Zaragoza 2008.
- Ratnakar Dhakate, V.S., Singh, B.C., Negi, Subhash Chandra, V., Ananda Rao (2008). Geomorphological and geophysical approach for locating favorable groundwater zones in granitic terrain, Andhra Pradesh, India. *Journal of Environmental Management*. 88, 1373–1383.
- Sánchez, F.J. (1985).- Prospección hidrogeológica en rocas metamórficas mediante geofísica eléctrica. *Studia Geol. Salm.* XX:127-136.
- Sánchez, F.J. ; M.A. de Andrés, y I. Tardáguila (1987).- Prospección hidrogeológica en rocas ígneas y metamórficas mediante Sondeos Eléctricos Verticales. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*, XI: 557-566.
- Shahid S, Nath SK, Roy J (2000). Groundwater potential modeling in a soft rock area using a GIS. *Int. J. Remote Sensing*, 21(9): 1919-1924.
- Singh AK, Prakash SR (2002) An integrated approach of remote sensing, geophysics and GIS to evaluation of groundwater potentiality of Ojhala Sub-watershed, Mirzapur District, UP, India. Conference paper, Asian Conference on GIS, GPS, Aerial Photography and Remote Sensing, Bangkok-Thailand.
- Talabi AO, Tijani, MN (2011) Integrated remote sensing and GIS approach to Ground-water potential assessment in the basement terrain of Ekiti area south-

- western Nigeria. RMZ—materials and geoenvironment, vol 58, no 3, pp 303–328.
- Teeuw, R.M. (1995). *Low cost remote sensing and GIS for groundwater exploration in northern Ghana*. Hydrogeology Journal, 3 (3), 21-30.
- Thornburry WD (1969) Principles of geomorphology. Willey, New York.
- Vouillamoz, J.M.; Martín-Loeches, M. y González, F. (2001). Técnicas geofísicas aplicadas a la exploración de aguas subterráneas en proyectos de ayuda humanitaria. Tierra y Tecnología, 21: 41- 51.
- WTP (2007) *Precipitation of Angola*. Disponible en http://www.bestcountryreports.com/Precipitation_Map_Angola.php.
- Wright, E.P. (1992) *The hydrogeology of crystalline basement aquifers in Africa*. Geological Society Special Publication No 66, pp 1-27.
- Wurzel, P. (2001) Drilling boreholes for handpumps. SKAT.
- Zerquera, J., Fernandes, M. C., y Camilo, M. (2008). *Angola. Atlas Geográfico*. Ensino Secundario. Ed. Macmillan Publishers Limited. 128 pp.
- Zohdy, A.A.R. (1974). *Application of surface geophysics to groundwater investigation*. U.S. Geol. Surv.