

Groundwater Exploration for a Sustainable Supply Plan in a Rural Community: Case Cadeate, Santa Elena, Ecuador

Paúl Carrión-Mero, Ph.D^{1,2}, Fernando Morante-Carballo, Ph.D^{1,3}, Marcela Toalombo-Chimborazo, Ing⁴, Daniella Mora-Villón, Ing^{1,2}, Josue Briones-Bitar, Ing^{1,2}, Edgar Berrezueta, Ph.D⁵

¹ Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Centro de Investigaciones y Proyectos Aplicados a las Ciencias de la Tierra (CIPAT), Campus Gustavo Galindo Km 30.5 Vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador, pcarrión@espol.edu.ec, fmorante@espol.edu.ec, damora@espol.edu.ec briones@espol.edu.ec.

² Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Facultad de Ingeniería Ciencias de la Tierra (FICT), Campus Gustavo Galindo Km 30.5 Vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador.

³ Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas, Campus Gustavo Galindo Km 30.5 Vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador.

⁴ Junta Administradora Regional de Agua Potable de Manglaralto (JAAPMAN), Manglaralto, Ecuador

⁵ Instituto Geológico y Minero de España, Calle Matemático Pedrayes, 25. 33006 Oviedo, España, e.berrezueta@igme.es

Abstract– Manglaralto Water Board (JAAPMAN, for its acronym in Spanish) has been supplying water to Cadeate since 1988, which helps to address the problem of water demand in the area. Water supply in this study area is done by the groundwater exploitation with the wells located in the Manglaralto coastal aquifer, focusing on the water supply to homes and commercial premises linked to tourism. In a shortage of times, water is also distributed through tank trucks, which have a high price and without guaranteeing quality standards. The aim of this study is to identify suitable places for the construction of wells and the consequent development of the exploitation of an aquifer by geological information and geophysical geoelectric tests for the subsurface layer's characterization of the study area and proposal of an exploitation plan of wells in the Cadeate Commune. The methodology is as follows: i) Processing of geographical and geological information of Cadeate, ii) Field survey and geophysical tests to obtain a geoelectric model, iii) Interpretation of results by using specialized software (IPI2Win and RES2DINV) and iv) proposal for a sustainable exploitation plan. Layers of a shallow coastal aquifer linked to the Cadeate seasonal river, approximately 5 to 20 m thick, were identified with detritic material dominated by gravels, sands, with an important presence of silt and clays.

These materials permeability reaches the magnitude of 10-3 m/s, and the average porosity is about 18%. A good exploitation plan was established, with a component of the rescue of ancestral knowledge for the establishment of artisanal dikes (tapes) that promote water sowing and harvesting.

Keywords– Coastal aquifer, Groundwater, Commune Cadeate, Aquifer exploitation, Geophysics.

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.294>
ISBN: 978-958-52071-4-1 ISSN: 2414-6390

EXPLORACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS PARA UN PLAN DE ABASTECIMIENTO SOSTENIBLE EN UNA COMUNIDAD RURAL: CASO CADEATE, SANTA ELENA, ECUADOR.

Paúl Carrión-Mero, Ph.D^{1,2}, Fernando Morante-Carballo, Ph.D^{1,3}, Marcela Toalombo-Chimborazo, Ing⁴, Daniella Mora-Villón, Ing^{1,2}, Josue Briones-Bitar, Ing^{1,2}, Edgar Berrezueta, Ph.D⁵

¹ Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Centro de Investigaciones y Proyectos Aplicados a las Ciencias de la Tierra (CIPAT), Campus Gustavo Galindo Km 30.5 Vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador, pcarrion@espol.edu.ec, fmorante@espol.edu.ec, damora@espol.edu.ec, briones@espol.edu.ec.

² Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Facultad de Ingeniería Ciencias de la Tierra (FICT), Campus Gustavo Galindo Km 30.5 Vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador.

³ Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas, Campus Gustavo Galindo Km 30.5 Vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador.

⁴ Junta Administradora Regional de Agua Potable de Manglaralto (JAAPMAN), Manglaralto, Ecuador

⁵ Instituto Geológico y Minero de España, Calle Matemático Pedrayes, 25. 33006 Oviedo, España, e.berrezueta@igme.es

Resumen– La Junta Administradora de Agua Potable Regional de Manglaralto (JAAPMAN) se encuentra abasteciendo de agua al sector de Cadeate (Ecuador) desde 1988 lo que ayuda a enfrentar el problema de la demanda de agua en la zona. El abastecimiento de agua en dicho sector de estudio se realiza mediante la explotación de agua subterránea con los pozos ubicados en el acuífero costero de Manglaralto, enfocándose en el abastecimiento de agua a las viviendas y locales comerciales vinculados al turismo. En momentos de escasez, el agua es también distribuida mediante tanqueros (carros cisternas), los cuales tienen un precio elevado y no garantizan su calidad. El objetivo de este trabajo es determinar los lugares idóneos para la construcción de pozos de agua mediante información geológica y ensayos geofísicos de geoeléctrica. De esta forma, tener una detallada caracterización de las capas del subsuelo del área de estudio y la configuración de un plan de explotación con criterios de sostenibilidad de pozos en la Comuna Cadeate. La secuencia de trabajo abordada consistió en: i) procesamiento de la información geográfica y geológica del recinto Cadeate; ii) reconocimiento de campo y ensayos geofísicos para obtener un modelo geoeléctrico; iii) interpretación de los resultados mediante el uso de programas informáticos especializados (IPI2win y RES2DINV) y iv) propuesta de plan de explotación sostenible. Se identificaron capas de un acuífero costero somero vinculado al río estacional Cadeate, de aproximadamente 5 a 20 m de espesor. Desde el punto de vista litológico, las capas están constituidas predominantemente por gravas, arenas con intercalaciones importante de limos y arcillas. La permeabilidad medida de estos materiales alcanza el orden de magnitud de 10^{-3} m/s mientras que su porosidad media está en 18%. Finalmente, se estableció un plan de explotación eficiente de los pozos con una componente enfocada al rescate del conocimiento ancestral para el establecimiento de diques artesanales (tapes) que promuevan la siembra y cosecha de agua.

Palabras claves– Agua subterránea, geoeléctrica, acuífero costero, explotación de acuíferos, comuna Cadeate.

Abstract–Manglaralto Water Board (JAAPMAN, for its acronym in Spanish) has been supplying water to Cadeate

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.294>

ISBN: 978-958-52071-4-1 ISSN: 2414-6390

18th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: “Engineering, Integration, and Alliances for a Sustainable Development” “Hemispheric Cooperation for Competitiveness and Prosperity on a Knowledge-Based Economy”, July 27-31, 2020, Virtual Edition.

(Ecuador) since 1988, which helps to address the problem of water demand in the area. Water supply in this study area is done by the groundwater exploitation with the wells located in the Manglaralto coastal aquifer, focusing on water supply to homes and commercial premises linked to tourism. In shortage times, water is also distributed through tank trucks, which have a high price and without guaranteeing quality standards. The aim of this study is to identify suitable places for the construction of wells and the consequent development of the exploitation of an aquifer by geological information and geophysical geoelectric tests. In this way, having a subsurface layer’s characterization of the study area and a proposal of an exploitation plan of wells in the Cadeate Commune. The method consists of the following sequence i) processing of geographical and geological information of Cadeate, ii) field survey and geophysical tests to obtain a geoelectric model, iii) interpretation of results by using specialized software (IPI2win and RES2DINV) and iv) proposal for a sustainable exploitation plan. Layers of a shallow coastal aquifer linked to the Cadeate seasonal river, approximately 5 to 20 m thick, were identified with detrital material dominated by gravels, sands, with an important presence of silt and clays. These materials permeability reaches the magnitude of 10^{-3} m/s, and the average porosity is about 18%. A well exploitation plan was established, with a component of the rescue of ancestral knowledge for the establishment of artisanal dikes (tapes) that promote water sowing and harvesting.

Keywords– Groundwater, Geophysics, Aquifer, Subsurface Interpretation.

I. INTRODUCCIÓN

Uno de los recursos más importantes para la supervivencia y desarrollo sostenible del ser humano es el agua. La Tierra, vista desde el espacio, muestra la abundancia de este recurso. Sin embargo, esa visualización corresponde a solo a agua salina no apta para el consumo. En cifras globales, nuestro planeta cuenta con un 70% de agua, aunque solo un 2.5% corresponde a agua dulce. [1]

Día a día, el consumo de este líquido vital crea la necesidad de encontrar nuevas fuentes de abastecimiento además de las fuentes tradicionales (ríos, lagunas y precipitaciones) y hacerlo, surge como un desafío para muchas comunidades que se ven restringidas en su desarrollo social y económico.

Es alarmante saber que una quinta parte de la población en el mundo se enfrenta a esta problemática a causa del calentamiento global y del crecimiento poblacional (ej. rápida urbanización y un ritmo acelerado de desarrollo en el sector agrícola). Actualmente, a unos 2500 millones de habitantes en el mundo el suministro de recurso vital les proviene directamente de aguas subterráneas, generando que un 20% de los acuíferos estén sobreexplotados, por lo que el mantenimiento de este suministro de agua presenta una importante problemática. [2]

Una fuente alternativa de obtención del recurso agua son los reservorios de agua subterránea sin explorar que podrían llegar a constituir aproximadamente un 50% de las reservas de agua dulce a nivel mundial según la ONU [3]. Sin embargo, existen limitaciones para su correcta explotación dado que son ecosistemas no aptos para uso indiscriminado. Pese a esto, el informe de Tom Gleeson explica qué, alrededor del 20% de estos acuíferos están siendo sobreexplotados. [3]

De acuerdo a la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), Ecuador tiene una importante disponibilidad de recursos hídricos en sistemas hidrográficos superficiales. El recurso hídrico más importante en Ecuador corresponde a las vertientes hídricas del Amazonas. En general, Ecuador ocupa el puesto 27 de los países con mayor capacidad hidrográfica. [4]

En cuanto al aprovechamiento subterráneo de agua en Ecuador, el organismo de control oficial INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología) tiene registros de aproximadamente 500 pozos excavados a nivel nacional. En su totalidad, Ecuador dispone de 430,000 Hm³ del recurso durante la época invernal disminuyendo a 150 Hm³ en épocas secas. [5]

Según la UNICEF, es derecho de todo ser humano tener disponibilidad de agua en cantidades suficientes para satisfacer sus necesidades básicas (personales y domésticas). Para cumplir esto, en Ecuador se creó el Plan Nacional para el Buen Vivir por la Secretaría Nacional del Agua. Esta iniciativa contempla como meta el otorgar al 88% de la población fuentes de agua de forma eficiente y continua. Además, pretende dotar a un 77% de estos de estructuras de saneamiento continuo. [6]

A pesar de que Ecuador dispone de 43500 m³ de agua por persona durante un año, valor que corresponde a un promedio 2.5 veces mayor que el mundial, existe un retraso para su abastecimiento a los habitantes [7]; pues su distribución no es del todo favorable ya que se tienen limitaciones para el acceso a la misma. Por ejemplo, en la región amazónica de Ecuador, donde hay el mayor potencial hídrico del país (88%), solo se encuentra un 4% de la población nacional.

Por otro lado, en la región costa, que es una zona cálida, húmeda, con presencia de precipitaciones de sur a norte y donde se cuenta con ríos de flujo continuo (como Esmeraldas y

Guayas) y ríos estacionales, también hay zonas (península de Santa Elena) donde el recurso agua se obtiene de pozos que explotan los acuíferos existentes. [8]

Según la OMS, un ciudadano satisfaría sus necesidades consumiendo 100 litros de agua, sin embargo, la cultura de ahorro de la misma no está en la mentalidad de todas las personas. Es importante entender que el agua es un recurso limitado e insustituible. En general, el valor medio de consumo es superado hasta alcanzar 150 litros/día llegando a alcanzar cifras de aproximadamente 237 litros en ciertos sectores del país. [1]

Ante esta circunstancia, resulta importante remarcar la inequidad en su distribución ya que, en temporadas carentes de precipitaciones, existe una fuerte escasez especialmente en las zonas cercanas al Sur de Esmeraldas, Manabí, Santa Elena y en los valles Interandinos, volviéndose indispensable la búsqueda de nuevas fuentes de agua dulce

En la península de Santa Elena se encuentran grandes problemas de obtención y distribución de agua potable. Uno de los principales motivos según [9] y [10] son que la Península tiene i) una precipitación media anual por debajo de 350mm y ii) valores elevados de evapotranspiración potencial (1000–1200 mm/año) por lo que se la considera una zona de clima semiárido.

Luego del último Censo disponible (2010), la parroquia Manglaralto abasteció solo a un 42% de la población por medio de Juntas administradoras de agua y el resto, tuvo que hacerlo mediante pozos [11]. Manglaralto, es una de las tantas poblaciones ecuatorianas que sufren por la escasez de agua debido a la fuerte demanda turística y agropecuaria, por lo que la comunidad se ha visto en la necesidad de explotar el agua subterránea para lograr disminuir la problemática y satisfacer en cierta medida sus necesidades [12].

Es por esto que La Junta Administradora de Agua Potable Regional de Manglaralto (JAAPMAN), quien se encarga de la distribución del recurso con la ayuda de organizaciones técnicas como el Centro de Investigaciones y Proyectos Aplicados a las Ciencias de la Tierra, ha constituido medidas planificadas para regular la distribución y el consumo del agua proveniente del acuífero de Manglaralto hacia zonas más alejadas del perímetro urbano como lo es la comuna Cadeate [13]. Debido al incorrecto procedimiento de abastecimiento del líquido mediante carros repartidores, se han producido enfermedades de la piel y estomacales en la población de la zona [14].

Toda la problemática conduce a plantear la siguiente pregunta, ¿El estudio para la valoración del recurso hídrico subterráneo en Cadeate aportaría a las reservas de los acuíferos administrados por la JAAPMAN? Actualmente, el acuífero de Manglaralto abastece de agua a la comuna Cadeate y otras comunas en los alrededores, sin embargo, en ciertas épocas del año, como en temporadas playeras, el número de pobladores aumenta momentáneamente haciendo que las pocas reservas de agua disminuyan.

Por todo lo expuesto anteriormente, el objetivo de este trabajo es determinar los lugares idóneos en la construcción de

pozos y el consecuente desarrollo de la explotación de un acuífero mediante información geológica y ensayos geofísicos de geoelectrónica para la caracterización de las capas del subsuelo del área de estudio y propuesta de un plan de explotación de pozos en la Comuna Cadeate.

II. ÁREA DE ESTUDIO

A orillas del mar se encuentra Cadeate, una de las siete comunas rurales que pertenecen a la parroquia Manglaralto. Cadeate se encuentra ubicada al noroeste del cantón Santa Elena, Ecuador (Fig. 1). Su población asciende a 1765 habitantes los cuales, reciben agua segura de la JAAPMAN en su mayoría proveniente de pozos, por la disposición del recurso mediante tuberías y, últimamente, de sistemas de recarga artificial mediante tapes (diques). El clima está representado por una secuencia climatológica en donde de enero a mayo existe una época de lluvias mientras que, de junio a diciembre, existen nulos o bajos niveles de precipitación. Este ciclo se ve afectado por dos principales agentes: a) la corriente de Humboldt, factor predominante que debido al desplazamiento del aire húmedo al este la provincia llega a temperaturas de 20°C e incluso menores y b) el fenómeno de El Niño, que permite alcanzar una temperatura media de 36°C durante la época seca. [15]

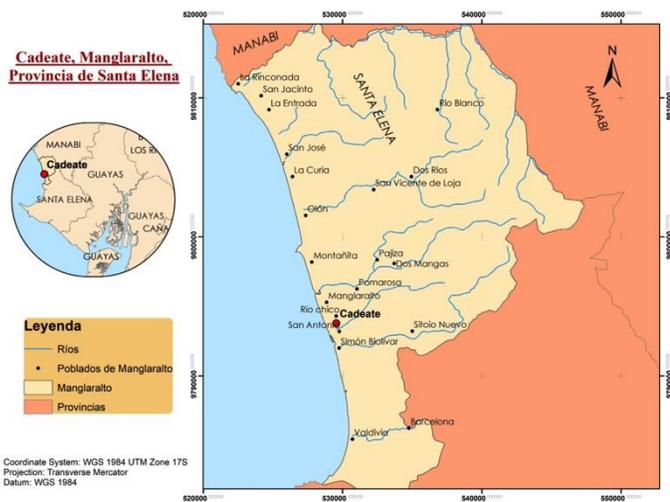


Fig. 1 Ubicación de comuna Cadeate, Manglaralto, Santa Elena

Geológicamente, la zona de estudio, está ubicada al pie de la cordillera Chongón-Colonche. El área de estudio está constituida por depósitos aluviales de rangos de entre 3 a 11 metros de profundidad de edad Holocénica que subyacen, discordantemente, a estratos de rocas de edad Cretácica y Miocénica: La base de la cuenca está formada por una secuencia volcano-sedimentaria seguida de las formaciones Guayaquil y Cayo caracterizados por lutitas tipo chert relacionadas con ambientes marinos someros e influenciadas también por rasgos calcáreos.

Estas características son propias del miembro Javita (Fm. San Eduardo) en las que se destaca la presencia predominante de fósiles algáceos alternando con calco-arenitas de grano grueso y contenido macro-fósil de foraminíferos, moluscos, bivalvos; subyaciendo se encuentra la Fm. Seca seguida de Fm. Zapotal y Fm. Tosagua siempre en constante contacto con el agua de mar [16] (ver Fig. 2).

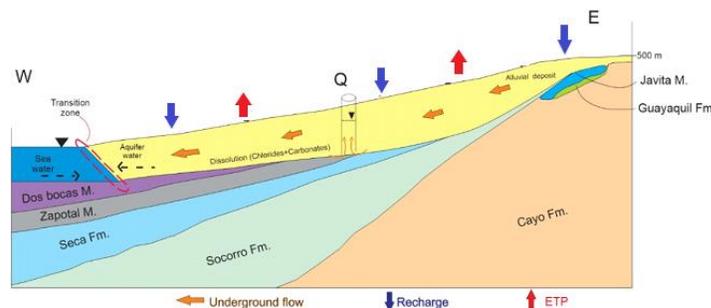


Fig. 2 Formaciones en la Micro-cuenca del río Manglaralto, siendo Cadeate una subcuenca de este sistema. Fuente: modificado de [16].

Así mismo, la cuenca del río Manglaralto se encuentra constituida por las formaciones antes mencionadas e ilustradas en la fig.2. En general, los materiales que la constituyen se originan en la Cordillera y viajan en dirección NE-SW a través de cuevas que desembocan en el margen costero, los aluviales pertenecientes a este acuífero están compuestos litológicamente por areniscas, lutitas silíceas, lutitas con yeso [17], de este acuífero se alimentan 25 pozos de los cuales 12 están administrados por la Junta Parroquial y abastecen a las comunas con agua entre ellas Cadeate, los demás son de uso privado.

III. METODOLOGÍA

El procedimiento de trabajo desarrollado en este estudio constó (Fig. 3):

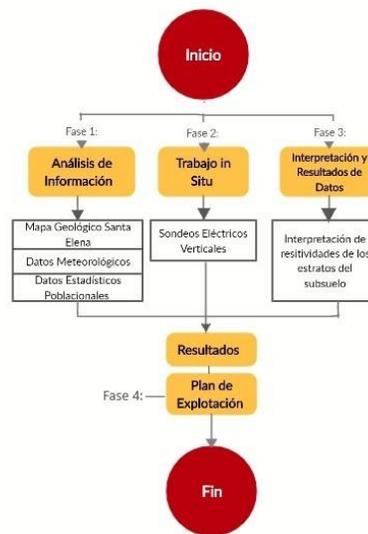


Fig.3 Esquema de la metodología.

Fase 1: Análisis de Información

Esta fase se orientó a recopilar la información base. Estos datos son necesarios para tener una visión general de la problemática. Se obtuvieron referencias del mapa geológico de Santa Elena, datos meteorológicos y datos estadísticos para conocer la cantidad de población a la que debe abastecerse de agua todo esto en base a estudios realizados previamente.

Fase 2: Trabajo in Situ

Esta fase se enfocó a la identificación de los lugares probablemente idóneos para la construcción de pozos en la comuna Cadeate se apoyaron de investigaciones geológicas, geofísicas y geomorfológicas anteriores del sector, así como también de las inferencias por parte de los comuneros, pobladores que por su experiencia práctica más no técnica predicen indicadores de presencia de agua; estas premisas se usaron de referencia inicial para realizar los sondeos eléctricos verticales (SEV's).

Los SEV's siguieron la configuración Schlumberger en donde los electrodos de inyección de corriente (A-B) y los de medición de potencial (M-N) cumplen con una separación de al menos 5MN [18] los realizados en Cadeate alcanzaron un AB/2 (resistividad aparente) y un alcance horizontal de 100 metros hacia ambos lados del Resistivímetro permitiendo alcanzar mayor profundidad y conocer la distribución de resistividades en el subsuelo.

Fase 3: Interpretación y Resultados de Datos

Con los datos de la Fase 2, medidos por el equipo Terrameter SAS 4000, se ejecutó la interpretación de resistividades con el programa IPI2win adquiriendo las curvas de campo parámetro como trabajo de oficina, esta curva admite un factor de ajuste del 5% y de este modo se evaluaron las litologías de los estratos factibles para almacenar (estrato impermeable) y movilizar el agua subterránea (estrato permeable) determinando los resultados.

Fase 4: Plan de Explotación

Esta fase estableció los lineamientos del plan de explotación del o de los pozos que satisfarán las necesidades de los pobladores de la comuna Cadeate, para su desarrollo se tomó en cuenta los siguientes parámetros para su diseño y construcción: estratigrafía del subsuelo definida por las muestras tomadas en el campo y el registro eléctrico; profundidad de perforación, así se determinaron las características concretas que debe tener el pozo (profundidad y diámetro de tuberías) para la satisfacción de la demanda de la comunidad, además los criterios de sostenibilidad se dan por la aplicación de rescate del conocimiento ancestral.

IV. RESULTADOS

A. Litologías de las Formaciones de la Cuenca Manglaralto.

Las formaciones descritas se relacionan a la fig. 2 para comprender la geología de la subcuenca Cadeate.

La formación Cayo se constituye como una unidad rocosa con 3 km de espesor de edad Cretácica tardía formada por lutitas calcáreas, lutitas tobáceas, limonitas, areniscas y rocas volcánicas depositadas en un ambiente marino los cuales aparecen como un levantamiento tipo horst en la Cordillera Chongón-Colonche. [19,20]

Siguiendo la dirección del flujo del agua la Formación Socorro considerada como un campo de arcilla resultante de la alteración de cenizas pertenecientes al volcanismo andino compuesta por arcillolitas y finas láminas de areniscas y lutitas intercaladamente. [21]

Depositada sobre la Fm. Socorro e integrada principalmente por limolitas, margas y lutitas con presencia de areniscas calcáreas y gran cantidad de bioturbación, la Formación Seca representa ambientes de plataforma próximas a talud. [22]

Formada litológicamente por rocas de ambiente marino somero hasta continentales entre ellas areniscas de grano grueso y estratos de conglomerados basales además de fósiles silicificados pertenecen a la Formación Zapotal. La formación Dos Bocas se unifica con la Formación Tosagua pues ambas están conformadas por areniscas con inclusiones de yeso, lutitas de colores claros y arcillas oscuras de espesores centimétricos a decimétricos. [23]

Por último, los depósitos aluviales provenientes de la erosión y arrastre de material de zonas altas (colinas), de litología heterogénea y depositados de forma caótica se encuentran clastos de lutitas, limolitas, areniscas, y gravas, geológicamente se infiere que este material inicial está dominado por las formaciones Seca, Zapotal y Tosagua. [24]

B. Correlación litológica correspondiente a los SEV's del subsuelo.

Con la información obtenida se llevaron a cabo diecinueve sondeos en localidades posicionadas por coordenadas X y Y. Los dieciséis primeros dentro de Cadeate sobre las formaciones Tosagua, Zapotal y Depósitos Aluviales, los otros tres dentro de Libertador Bolívar. Todos ellos con el fin de confirmar la correlación de la roca almacén entre estas dos comunas. Estas ubicaciones se reflejan en la fig. 4.

Para cada sondeo se utilizó el programa IPI2win para obtener la curva parámetro y las resistividades de las capas encontradas en el subsuelo. En la fig. 5 se muestra el resultado del sondeo CD-01 con la correspondiente tabla de datos generados por el software; se determinó la primera capa como suelo limo-arcilloso, la siguiente como una capa de gravas y arenas, limos salinos la tercera y terminando con rocas consolidadas en la profundidad máxima alcanzada 22.8m.

Ubicación de Sondeos Eléctricos Verticales

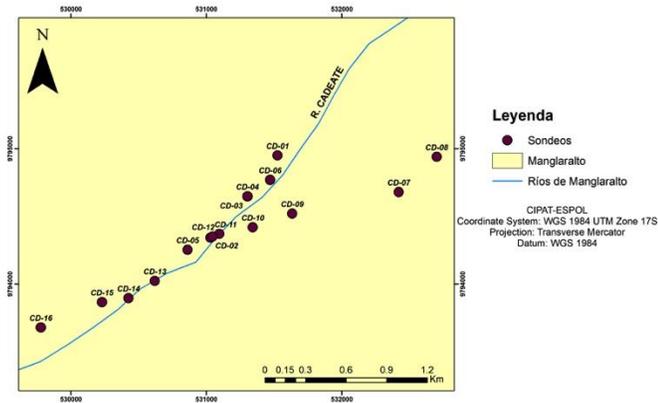


Fig. 4 SEV's en la comuna Cadeate y Libertador Bolívar.

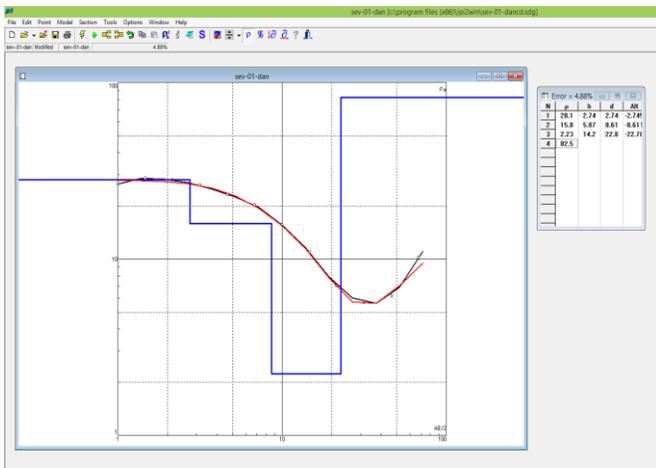


Fig. 5 Curva parámetro y tablas de resistividades generada en IPI2WIN para el sondeo CD-01.

Con las resistividades generadas se interpretaron y asignaron litologías a cada estrato de cada sondeo escogido distribuyéndolos de acuerdo a su profundidad. El subsuelo de la microcuenca de Cadeate está configurado por cuatro capas dominantes: arena limosa, limo arcilloso, arenas con intercalaciones de arcilla, gravas y arenas, además de la presencia del basamento (roca consolidada), litologías que siguen el modelo teórico presentado en la Fig. 2. Considerando las descripciones del Apartado A de esta sección, y correlacionando los datos de la microcuenca del río Simón Bolívar, las relaciones estratigráficas de campo y con la interpretación de la geoelectrónica, se establecen los resultados e interpretaciones de la zona.

Los datos de las resistividades de los sondeos están resumidos en la Tabla 1. Se determinaron litológicamente los siguientes sondeos: CD-07 la primera capa limo-arenoso a una profundidad de 0.5m, la segunda capa de limo arcilloso con grado de salinidad a los 2.257m, siguiéndole arenas y gravas a 37.16 m. CD-09 a una profundidad de 0.6084.m se tiene suelo altas resistividades representando roca consolidada,

a los 1.95 m g una capa limo-arenoso, a los 17.2 m continuidad de capa limo-arenosa, terminando con arenas y gravas a los 57.9m; y, CD-10 se encuentran capas a 0.667 arenas y gravas, estrato areno-limoso a los 6.548m, a los 17.13 m capa de limo arcilloso con grado de salinidad, y alcanzando la profundidad máxima a los 30.31m una capa de arenas y gravas.

TABLA I
DATOS DE RESISTIVIDADES, PROFUNDIDAD Y LITOLOGÍA DE LOS SONDEOS CD-07, CD-09, CD-10; CADEATE-MANGLARALTO.

Cadeate	CD-07			CD-09			CD-10			
	Prof. (m)	Resist. (Ω.m)	Litología	Prof. (m)	Resist. (Ω.m)	Litología	Prof. (m)	Resist. (Ω.m)	Litología	
Estratos	1	0.5	13.4	Limo-arenoso	0.6084	91.3	Roca consolidada	0.667	69.2	Arenas y Gravas
	2	2.257	5.78	Limo arcilloso con grado de salinidad	1.95	15.6	Limo-arenoso	6.548	20.4	Areno-limoso
	3	37.16	62.4	Arenas y Gravas	17.2	9.06	Limo-arenoso	17.13	4.13	Limo arcilloso con grado de salinidad
	4		1.34	Limo arcilloso con grado de salinidad	57.9	46.7	Arenas y Gravas	30.31	67.7	Arenas y Gravas
	5					706	Roca consolidada		81.3	Roca consolidada

La Tabla 2 representa los valores de los sondeos CD-04, CD-02, CD-05 que posee litologías semejantes a los sondeos ya mencionados, el primero tiene una capa areno limosa a los 0.983m, seguida de una capa limo arenosa a los 5.35m, material limoso con grado de salinidad a los 10.40m, el segundo inicia a los 0.525m con suelo areno limoso continuando a los 2.61m, a los 12.5m limo arenoso, a la profundidad máxima alcanzada 20.5m limo arcilloso con grado de salinidad, el último sondeo a los 0.55m suelo areno limoso, a los 4.51m limo arenoso y a los 9.12m una capa de limo arcilloso con grado de salinidad.

TABLA II
DATOS DE RESISTIVIDADES, PROFUNDIDAD Y LITOLOGÍA DE LOS SONDEOS CD-04, CD-02, CD-05; CADEATE-MANGLARALTO.

Cadeate	CD-04			CD-02			CD-05			
	Prof. (m)	Resist. (Ω.m)	Litología	Prof. (m)	Resist. (Ω.m)	Litología	Prof. (m)	Resist. (Ω.m)	Litología	
Estratos	1	0.983	28.9	Areno-limoso	0.525	28.6	Areno-limoso	0.555	35	Areno-limoso
	2	5.35	10.7	Limo-arenoso	2.61	31.9	Areno-limoso	4.61	10	Limo-arenoso
	3	10.4	4.54	Limo arcilloso con grado de salinidad	12.5	11.2	Limo-arenoso	9.12	1.39	Limo arcilloso con grado de salinidad
	4		19	Areno-limoso	20.5	1.47	Limo arcilloso con grado de salinidad		84.7	Roca consolidada
	5					84.27	Roca consolidada			

La fig. 6 refleja la propuesta de la ubicación de los pozos debido al volumen de agua reservado en la actualidad al igual que la demanda que tienen los pobladores de Cadeate. Se incluye también posible ubicación para la implementación de tapes, que son diques en la ingeniería actual, como parte del rescate del conocimiento ancestral que se está practicando en estas comunidades, como un principio pragmático y de

sostenibilidad, que aportarán con la recarga del acuífero en tiempos de sequía.

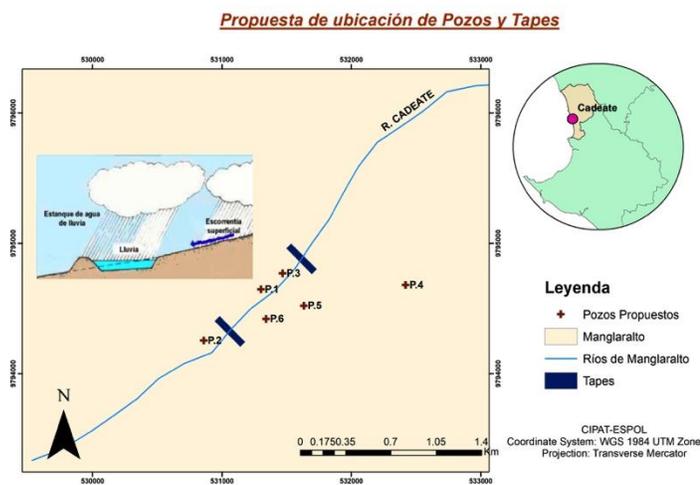


Fig. 6 Propuesta de ubicación de Pozos y Tapes en Cadeate.

V. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con la información geológica recolectada a partir de los sondeos eléctricos verticales se determinó que el acuífero de Cadeate está conformado por depósitos aluviales de arenas gruesas y gravas, las cuales son litologías viables para la infiltración del agua en el terreno hasta un 10% aproximadamente, proveniente de las precipitaciones por recarga natural. Según [25], el basamento de la misma está constituido por capas de arcillas pertenecientes a la Formación Zapotal y por lutitas de la Formación Socorro que responden a altas resistividades durante las pruebas realizadas. Además, los resultados presentan una litología aceptable para la construcción de pozos y para la disposición del recurso de manera sustentable.

La correlación establecida por las columnas estratigráficas de los sondeos CD-7, CD-9, CD-10 (Fig. 7) se determinaron según su ubicación pues, cada uno, se encuentra a una distancia considerable de la cuña salina en el subsuelo. Las capas de gravas y arenas presentes a 37.16 m, 57.9m, 30.31m, respectivamente tienen la litología con una correcta permeabilidad para encontrar agua, además según las resistividades no existen sales disueltas asegurando la calidad de la misma.

Los sondeos CD-04, CD-02, CD-5 también fueron correlacionados (Fig. 8) a partir de los datos generados por las curvas parámetros. La litología con mayor permeabilidad en estos sondeos son arenas limosas y limos arenosos a 5.35m, 12.5m, 4.61m de profundidad, los cuales se asientan sobre limo arcilloso con cierto grado de salinidad. Sin embargo, no representan problemas ya que se disminuye la cantidad de sales disueltas por efecto de recargas artificiales, siendo agua permisible de explotar para consumo.

Es decir, los lugares idóneos para la construcción de pozos se disponen en las zonas de sondeos CD-07, CD-09 y CD-10; se los escogió por la ya mencionada presencia de capas de alta permeabilidad la cual permite el almacenamiento y movilidad suficiente de agua para abastecer al pozo que se construirá; y las zonas de los sondeos CD-04, CD-02, CD-05 en donde, a pesar de tener capas con menor permeabilidad, también se consideran aptas para cumplir con las funciones del pozo en cuestión.

Es por esto que para la grava, el diseño de empaque de la misma es de: 5 mm a 2cm; el pozo tendrá un diámetro de 10 pulgadas y el ancho de la capa de grava será de 20 pulgadas. La profundidad del pozo recomendada es de 32 metros para la zona 1 y de 12 metros para la zona 2, constituido por sendos tubos ranurados de 6 metros cada uno seguido de 4 tubos ciegos que ocupan una longitud de 24 metros.

Además, con la demografía de Cadeate en constante aumento, existe mayor demanda del recurso hídrico, pero al mismo tiempo las reservas de Cadeate calculadas según [26,27] aportarían en un 19,08% la cual ayudaría a que el planteamiento de la gestión sea sostenible y rentable. En particular, enfocados a utilizar la mecánica de procesos naturales para la retención del agua y, principalmente, la mejora de su calidad para que la comuna pueda consumirla [11, 13].

En la siembra y cosecha de agua es participe la recolección e infiltración de la precipitación en el subsuelo para luego, recuperarla en un período determinado de tiempo (aproximadamente 45 días). Los tapes o diques son estructuras colocadas en forma perpendicular a cauces principales de los ríos en forma de muros. Su construcción es una técnica adecuada para captar agua lluvia y que ésta se infiltre en el subsuelo para luego, explotarla mediante pozos [26,27].

La construcción de pozos es una también una técnica muy acertada para contribuir con el desarrollo de comunidades en desarrollo como Cadete. Esto se comprueba en otras provincias de Ecuador como Pichincha, por ejemplo, que tiene como población al 6% de los habitantes totales del Ecuador y en donde, gracias a la geofísica, se ha determinado un importante acuífero de tipo aluvial. Este acuífero perteneciente a la Formación San Mateo, se explota por medio de pozos con un volumen de descarga de entre 60 a 4500 litros por minuto, suministrando a la población agua de calidad, de forma segura y continua. [28]

Así mismo, a nivel mundial, en la India y en particular en la región de Bathalapalli, los habitantes debían recorrer grandes distancias para conseguir agua que frecuentemente estaba contaminada por distintos factores. Sin embargo, gracias a la fundación “We are water”, que instaló diez pozos y bombas manuales, se consiguió un abastecimiento de entre tres a cuatro litros diarios por cada familia beneficiada (5245 familias). Las autoridades locales y regionales consideran este método como una medida rentable y que satisface, de alguna manera, las necesidades inmediatas de los ciudadanos que viven en zonas rurales alejadas de las urbanas. [29]

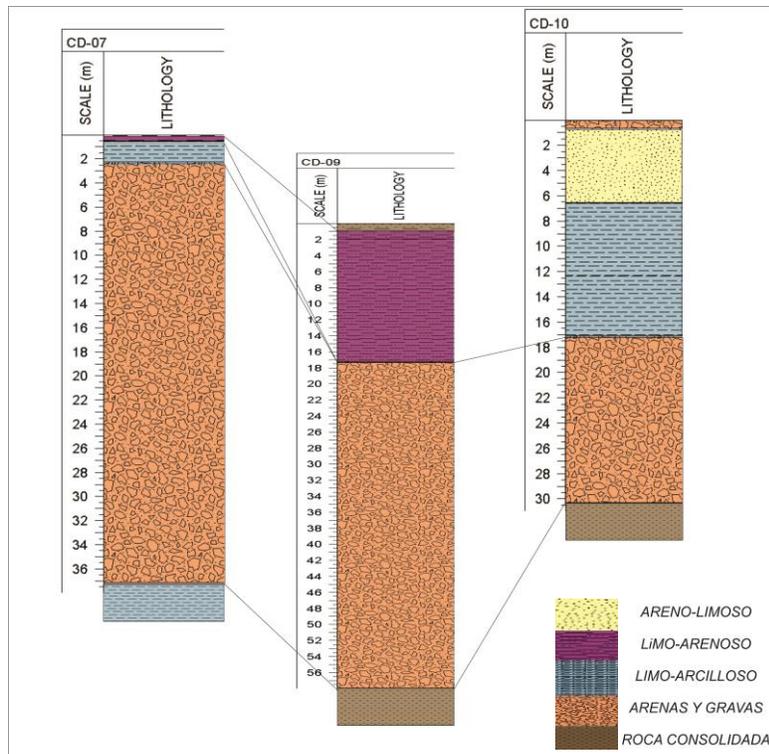


Fig. 7 Correlación estratigráfica del Perfil geoelectrico 1 (E-W), correspondiente a CD-07, CD-09, CD-10.

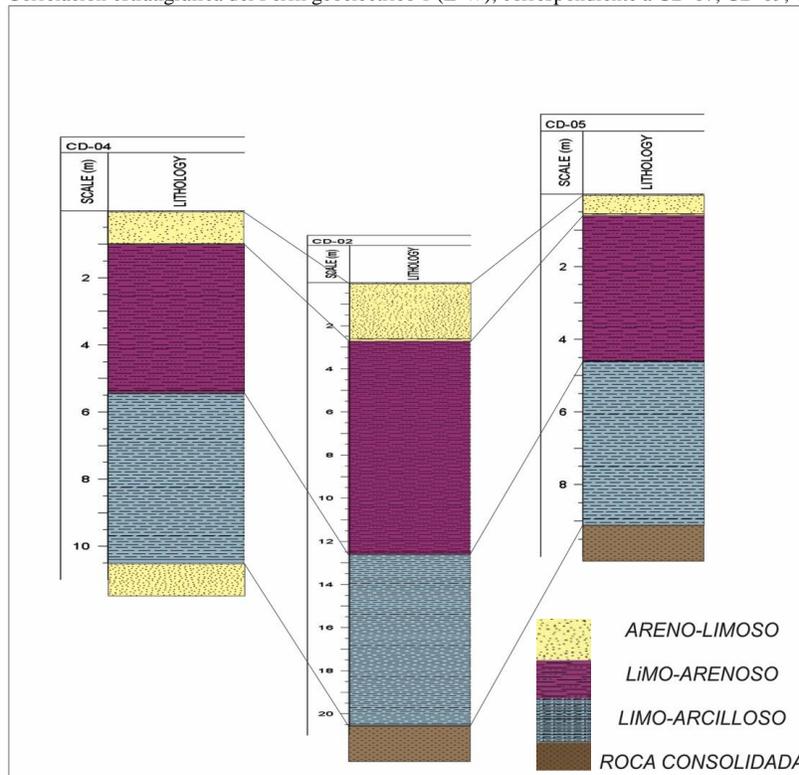


Fig. 8 Correlación estratigráfica del Perfil geoelectrico 2 (SW-NE) entre CD-04, CD-02, CD-05.

VI. CONCLUSIONES

Desde el punto de vista de los resultados obtenidos, la cuenca tiene la fluencia de dos vertientes por la cual corresponde un sitio propicio debido a que la terraza aluvial acumula materiales detríticos con mayor volumen y mayor espesor guardando las características de un acuífero costero semi-confinado y poroso.

Los materiales en el sector son de origen aluvial; depósitos que se han formado por el transporte de arcillas, arenas, gravas mediante el acarreo por los cuerpos de aguas existentes en la zona (ríos), agua de escorrentía, vientos y otros factores meteorológicos. De tal forma que contribuyen al transporte de estos materiales a los sitios más bajos.

Los valores de resistividad Ohm obtenidos mediante el sondeo eléctrico vertical en campo permitieron identificar al acuífero y por tanto, se propone realizar una perforación de 18 metros de profundidad en el sector de la confluencia de los ríos.

La correlación estratigráfica de los sondeos CD-07, CD-09 y CD-10 y CD-04, CD-02, CD-05; muestra a estos sectores como un sitio idóneo para la elaboración de un pozo debido a que la capa permeable se mantenía en los tres sondeos.

El análisis hidrográfico de la subcuenca del río Cadeate refleja que puede tener un aporte significativo de volumen, que se suma a la reserva de agua del acuífero de Manglaralto, facilitando el trabajo de repartición de agua hacia las familias de la comuna por parte de la JAAPMAN. Cabe mencionar que la construcción de tapes (diques) va a potenciar aún más el aprovechamiento sostenible del recurso agua y, complementariamente, que la utilización de esta técnica será un reconocimiento y rescate del conocimiento ancestral, denominada en forma genérica la siembra y cosecha de agua (SyCA).

ACKNOWLEDGMENT

Los autores queremos agradecer a los miembros de la Junta de agua de Manglaralto JAAPMAN, al Centro de Investigación y Proyectos Aplicados a las Ciencias de la Tierra CIPAT con su proyecto de vínculos con la sociedad "Hidrología e Hidrogeología aplicada al acuífero costero de Manglaralto" y al proyecto de investigación "Registro de patrimonio geológico y minero y su incidencia en la defensa y preservación de la geodiversidad en el Ecuador".

REFERENCES

- [1] Unesco, Informe de las Naciones Unidas sobre los Recursos Hídricos en el Mundo, 2015. Organización de las Naciones Unidas para la Educación y la Cultura. Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP, por sus siglas en inglés).
- [2] M. Arévalo, Propuesta de Diseño de Construcción, Acondicionamiento de un Pozo de Agua y su Incidencia en la Vulnerabilidad del Acuífero Costero en Manglaralto, Tesis de grado, Guayaquil: Escuela Superior Politécnica Del Litoral, 2017.
- [3] T. Gleeson, J. Vander Steen, M.A. Sophocleous, M. Taniguchi, W.M. Alley, D.M. Allen and Y. Zhou, "Groundwater sustainability strategies", *Nature Geoscience*, vol. 3, no 6, pp. 378-379, 2010,
- [4] Carta Financiera, Los 10 países con más reservas de agua en el mundo. <http://www.cartafinanciera.com/tendencia-actual/los-10-paises-con-mas-reservas-de-agua-del-mundo>
- [5] N. Burbano, S. Becerra, & E. Pasquel, "Introducción a la Hidrogeología del Ecuador", Quito, Ecuador, 2015
- [6] A. Molina, A.M. Pozo, & J. Serrano, "Agua, saneamiento e higiene: medición de los ODS en Ecuador", Instituto Nacional de Estadística y Censos y UNICEF (INEC-UNICEF), 2018
- [7] H. Cabrera, H. Garcés and P. Paredes, "Proyecto de desarrollo de capacidades para el uso seguro de aguas servidas en agricultura", Producción de Aguas Servidas, Tratamiento y Uso en el Ecuador, pp. 45-49, 2012.
- [8] Comisión Económica para América Latina, CEPAL. <https://www.cepal.org/es/temas/desarrollo-territorial>
- [9] Cambio Climático. Detección de cambio climático en el Ecuador, Instituto Nacional De Meteorología e Hidrología (INAMHI). http://euroclimaplus.org/intranet/_documentos/repositorio/01Comunicacion/C3%B3n%20NUCambio%20Clim%C3%A1tico_2001Ecuador.pdf
- [10] Datos Meteorológicos de la Red INOCAR, INOCAR. <https://www.inocar.mil.ec/web/index.php/productos/estaciones-meteorologicas>
- [11] P. Carrión, G. Herrera, J. Briones, C. Sánchez and J. Limón, "Practical adaptations of ancestral knowledge for groundwater artificial recharge management of Manglaralto coastal aquifer, Ecuador", *Wit transactions on ecology and the environment*, vol. 217, pp. 375-386, 2018,
- [12] P. Romero, P. Carrión, F. Morante, W. Pincay, J. Cabrera, "Casos de Estudio de Hidrogeología Minera en Ecuador". Red Iberoamericana para la Aplicación y Divulgación de Tecnologías Limpias Enfocadas a la Caracterización y Aprovechamiento de Recursos Minerales: Minería del Siglo XXI". Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED). Tipo de participación: oral. Publicación: Técnicas aplicadas a la caracterización y aprovechamiento de recursos geológico-mineros. Volumen I: Descripciones Metodológicas. ISBN: 978-84-96023-87-1. 2010.
- [13] G. Herrera, P. Carrión y N. Alvarado, "Participatory Process for Local Development: Sustainability of Water Resources in Rural Communities: Case Manglaralto-Santa Elena, Ecuador", *Handbook of Sustainability Science and Research*, pp. 663-676, 2018
- [14] M. Saeteros, "Estimación de la Tarifa del Agua de los Acuíferos Costeros para la Gestión Sostenible del Recurso. Caso de Estudio: Manglaralto, Santa Elena, Ecuador", *Tesis de grado*, Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2014
- [15] V. Quinteros, "Propuesta de Gestión del Recurso Agua mediante la Utilización de Conocimientos Ancestrales en la Parroquia Manglaralto", *Tesis de Maestría*, Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2013.
- [16] F. Morante, F. Montalván, P. Carrión, G. Herrera, J. Heredia, F. Elorza and J. Solórzano, "Hydrochemical and geological correlation to establish the groundwater salinity of the coastal aquifer of the Manglaralto river basin, Ecuador", *Wit transactions on ecology and the environment*, vol. 229, pp. 139-149, 2019
- [17] E. Merino, "Evaluación de la intrusión salina en un acuífero costero y el impacto al suministro de agua potable en Manglaralto provincia de Santa Elena", *Tesis de grado*, Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2014.
- [18] M. Auge, "Métodos geoelectricos para la prospección de agua subterránea", Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, 2008.
- [19] L. Machiels, R. Snellings, F. Morante, J. Elsen, J. & C. Paredes, C. "Zeolite occurrence and genesis in the Late-Cretaceous Cayo arc of Coastal Ecuador: Evidence for zeolite formation in cooling marine pyroclastic flow deposits", *Applied Clay Science*, vol. 87, pp. 108-119, 2006.
- [20] Machiels, L., Morante, F., Snellings, R., Calvo, B., Canoira, L., Paredes, C. and Elsen, J., "Zeolite mineralogy of the Cayo formation

in Guayaquil, Ecuador”, Applied Clay Science, vol. 42, no. 1-2, pp. 180-188, 2008.

- [21] A. Morales, A. Varajão, J. César-Mendes and P. Carrión, “Bentonite: The state of the art in Guayas Province and its application to the Santa Elena Peninsula, Ecuador”, *Boletín Geológico y Minero*, vol. 117, no. 4, pp. 723-735, 2006.
- [22] A. Villacís, “Modelo estático de la formación Atlanta en el área certeza del campo Ancón Península de Santa Elena”, *Tesis de grado*, Quito: Universidad Central del Ecuador, 2018
- [23] C. Rodríguez, “Caracterización hidrogeológica de las cuencas de los ríos Javita y Zapotal de la península de Santa Elena”, *Tesis de grado*, Quito: Universidad Central del Ecuador, 2014
- [24] D. Chunga and I. Rivero, “Estudio de Geología de Superficie para el proyecto “Estudio de factibilidad para la construcción de una presa en el sector del Suspiro, Cantón Colonche de la provincia de Santa Elena”, 2015.
- [25] J. Valencia, “Análisis hidrogeológico de la cuenca del río Manglaralto para la caracterización de sus sistemas acuíferos”, *Tesis de grado*, Guayaquil: Escuela Superior Politécnica Del Litoral, 2017.
- [26] S. Martos-Rosillo, A. Durán, M. Castro, J. Vélez, G. Herrera, J. Martín, L. Mateos, J. Durán, A. González-, A. Ruiz, J. Jódar, C. Marín, C. Gutiérrez; R. Hermoza, J. Bardales and F. Peña, “La Siembra y Cosecha del Agua en Iberoamérica; un sistema ancestral de gestión del agua que utiliza Soluciones Basadas en la Naturaleza”, *Tierra y Tecnología*, no. 55, 2020.
- [27] G. Herrera, P. Carrión, P. and J. Briones, “Management practices for a sustainable community and its impact on development, Manglaralto-Santa Elena, Ecuador”, *Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology*, vol. 2019, 2019.
- [28] J. Cela,” Diagnóstico de las estadísticas del agua en Ecuador”, informe final, 2012.
- [29] N. Raju, T. Reddy, and P. Munirathnam, “Subsurface dams to harvest rainwater—a case study of the Swarnamukhi River basin, Southern India.” *Hydrogeology Journal*, vol. 14, no 4, p. 526-531, 2006.