



REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
UNIVERSIDAD DE MOA
“Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”
FACULTAD DE GEOLOGÍA Y MINERÍA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

Trabajo de diploma en opción al título de Ingeniera Geóloga

***Título:** Índices de calidad de agua del río Moa y su influencia en los costos para el tratamiento de potabilización.*

Autora: Ana Silvia Jardínez Ocampo.

Tutora: MSc. Moraima Fernández Rodríguez.

Moa, 2019
Año 61 de la Revolución

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

En decisión conjunta, la autora Ana Silvia Jardínez Ocampo y la tutora Moraima Fernández Rodríguez, certificamos nuestra propiedad intelectual en este Trabajo de Diploma, el cual se titula “Índices de calidad de agua del río Moa y su influencia en los costos para el tratamiento de potabilización.” La Universidad de Moa, podrá hacer uso del trabajo para sus fines educativos y docentes a partir del 2020.

Autor: Ana Silvia Jardínez Ocampo

Tutora: MSc. Moraima Fernández Rodríguez

Agradecimientos.

Gracias a mi tutora la MSc. Moraima Fernández Rodríguez, por haberme guiado en todo el periodo transcurrido para la realización de este Trabajo de Diploma, por su tiempo, paciencia, dedicación y sus enseñanzas.

Gracias a mis padres por su apoyo incondicional, por hacerme más fácil este duro bregar, con su ayuda, y comprensión, en especial a mi madre Inés María Ocampo Pupo por todo su apoyo en los momentos necesarios.

Gracias a mi esposo por estar conmigo en cada situación difícil, y por tolerarme en los momentos más complejos, así como, por compartir y propiciarme los buenos.

Agradezco a mi hermana Milagro Jardínez Ocampo y mi sobrina Angélica Brocard Jardínez por todo el apoyo.

Gracias a mis suegros José Miguel Mendoza Sierra y Virginia Maris Rodríguez Navarro por el apoyo y comprensión.

Muchísimas gracias al colectivo de trabajo de la Planta Potabilizadora de la ECG, en especial a los tecnólogos Eddy Batista y Yannelis Favier, al Ing. Manuel González Turro, al Lic. José Torruella Pedralle y a la especialista Ada Góngora. Gracias a todos.

Gracias al claustro de profesores del ISMM, porque todos de forma general han contribuido en mi formación, en especial al Dr. José Nicolás Muñoz y el MSc. Yurisley Valdés Mariño, a todos los profesores del Departamento de Geología.

Gracias a mis compañeros de aula por todo su apoyo, en especial a Lía, Rosy, Mile, Katy y Yunelvis.

Agradezco a mis amigos Armando Guevara, Hendris Guilarte, Jorge Urra Y Nelsy Domínguez por su apoyo.

Agradecer de todo corazón a cada uno de mis vecinos por su atención hacia mí. Y a todos los que me ayudaron con el propósito de verme convertida en una profesional mi más sincera gratitud, Gracias...

Pensamiento

La ciencia es buena porque nos enseña a distinguir por medio de la acción lo posible y lo imposible, porque nos instruye al respecto de nuestros verdaderos deberes y nos libera de la servidumbre, de la ignorancia y el error.

Anatole France

RESUMEN

Las fuentes de aguas superficiales son imprescindibles para el desarrollo de las actividades socioeconómicas llevadas a cabo por los seres humanos. El objetivo de la investigación es evaluar la calidad de las aguas del río Moa y su influencia en los costos para el tratamiento de potabilización. Se utilizó la metodología del Índice de Calidad de Agua (ICA) de Montoya, que permite evaluar los indicadores de calidad de las aguas para diferentes usos, mediante la integración de las variables físicas, químicas y bacteriológicas. Se determinaron los principales factores naturales y antrópicos que afectan la calidad de las aguas captadas y los costos de reactivos químicos en el proceso de tratamiento. Los principales factores naturales y antrópicos que afectan la calidad de las aguas del río Moa son: las precipitaciones, la topografía, los procesos de erosión y meteorización, la minería, las vías de comunicación, la deforestación y aguas residuales de Planta de Preparación de Pulpa. Las aguas se clasifican en Hidrocarbonatadas-Magnésicas. Según el ICA de Montoya se clasifican en aguas aceptables y aguas poco contaminadas. Los costos incurridos por concepto de reactivos químicos ascendieron a 13 252.60 CUP y en 14 445.33 CUC, dado por un sobreconsumo de 35.58 t de sulfato de aluminio y 1.60 t de cloro gaseoso. Se realizó un plan de medidas de prevención y mitigación de la contaminación de las aguas del río Moa, aplicables a escala de la cuenca y de la Planta Potabilizadora.

ABSTRACT

Surface water sources are essential for the development of socio-economic activities carried out by human beings. The objective of the investigation is to evaluate the quality of the waters of the Moa River and its influence on the costs for the treatment of potabilization. The methodology of the Water Quality Index (ICA) of Montoya was used, which allows the evaluation of water quality indicators for different uses, by integrating the physical, chemical and bacteriological variables. The main natural and anthropic factors that affect the quality of the water captured and the cost of chemical reagents in the treatment process were determined. The main natural and anthropic factors that affect the quality of the waters of the Moa River are: rainfall, topography, erosion and weathering processes, mining, communication routes, deforestation and wastewater from the Pulp Preparation Plant. The waters are classified in Hydrocarbonated-Magnesian. According to the ICA of Montoya, they are classified into acceptable waters and low-polluted waters. The costs incurred for chemical reagents amounted to 13 252.60 CUP and 14 445.33 CUC, due to overconsumption of 35.58 t of aluminum sulphate and 1.60 t of chlorine gas. A plan of measures to prevent and mitigate the pollution of the waters of the Moa River, applicable at the scale of the basin and the Water Treatment Plant, was carried out.

ÍNDICE:

RESUMEN	V
ABSTRACT	VI
INTRODUCCIÓN	1
MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL	4
Introducción	4
Agua cruda.....	4
Agua potable.....	4
Agua tratada	4
Contaminación del agua	4
Costo.....	5
Potabilización.....	5
Tratamiento convencional	5
Índices de calidad de las aguas (ICA).....	5
Color:	6
CAPÍTULO I: CARACTERÍSTICAS FÍSICO- GEOGRÁFICAS, GEOLÓGICAS REGIONALES Y PARTICULARES DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	8
1.1 Introducción	8
1.3 Características hidrográficas regionales.	9
1.4 Clima.....	11
1.4.1 Precipitaciones.....	12
1.4.2 Humedad y evaporación	13
1.4.3 Vientos	13
1.6 Geología regional y local.....	15
1.7 Tectónica regional.....	18
1.8 Vegetación regional	22
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA Y VOLÚMENES DE LOS TRABAJOS REALIZADOS.....	25
2.1 Introducción	25
2.2 Etapa I. Búsqueda y revisión bibliográfica	26
2.3 Etapa II: Trabajo de campo y de laboratorio.	37

2.3.1 Reconocimiento de los principales factores naturales y antrópicos que influyen en la calidad de las aguas del río Moa.	37
Influencia del cambio climático en la calidad de las aguas del río Moa.	42
2.3.2 Tratamiento convencional para la potabilización del agua.....	43
2.3.3 Análisis en el laboratorio	49
2.4 Etapa III Trabajo de Gabinete.	51
Procesamiento y análisis de la información	51
2.5 Metodología para la evaluación de la calidad de las aguas por su composición química	51
2.5.1 Índice de Calidad de Agua según Montoya et al., 1997.....	53
2.5.2 Metodología del Índice de Calidad de Agua según Montoya et al., 1997.	53
CAPÍTULO III: ÍNDICE DE CALIDAD DE AGUA DEL RÍO MOA Y SU INFLUENCIA EN LOS COSTOS DE TRATAMIENTO DE POTABILIZACIÓN.	57
3.1 Aspectos generales.....	57
3.2 Evaluación y clasificación de las aguas del río Moa por su composición química y propiedades físicas.....	58
3.2.1 Clasificación de las aguas por su mineralización según Aliokin.....	61
3.2.2 Clasificación de las aguas por su composición química según Aliokin.....	63
3.2.3 Clasificación de las aguas por el pH según E.B Pasoxov.	65
3.2.4. Clasificación de las aguas por su dureza total según Aliokin.....	66
3.2.5 Alcalinidad (mg/L)	67
3.2.6 Color (Pt/Co)	68
3.2.7 Turbidez (NTU)	68
3.2.8 Conductividad (µs/cm)	69
3.2.9 Sólidos Totales Disueltos (STD)	70
3.2.10 Temperatura (°C)	71
3.2.11 Materia Orgánica, Demanda Biológica de Oxígeno (DBO ₅) y Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	71
3.2.12 Calcio (Ca ²⁺)	72
3.2.13. Magnesio (Mg ²⁺)	73
3.2.14 Sodio y Potasio	74
3.2.15 Cloruros (Cl ⁻).....	75

3.2.16 Hierro (Fe^{2+})	76
3.2.17 Manganese (Mn^{2+})	77
3.2.18 Aluminio (Al^{3+})	78
3.2.19 Níquel (Ni^{2+})	78
3.2.20 Sulfatos (SO_4^{2-})	79
3.2.21 Hidrocarbonatos (HCO_3^-) y carbonatos (CO_3^{2-}).....	80
3.2.22 Nitritos (NO_2^-)	81
3.2.23 Nitratos (NO_3^-)	81
3.3 Evaluación de los resultados de los análisis bacteriológicos.	82
3.4 Evaluación de la calidad de las aguas del río Moa a través del ICA según Montoya.	84
3.5. Evaluación del consumo de reactivos químicos para el tratamiento de potabilización de las aguas para consumo humano e industrial.	85
3.6. Influencia de los factores naturales y antrópicos en la calidad de las aguas utilizadas en el proceso de tratamiento de potabilización.	86
3.7. Evaluación de los costos para el tratamiento de potabilización de las aguas para consumo humano e industrial por concepto de reactivos químicos.	88
3.8 Medidas de control que garanticen la calidad de las aguas del río Moa.	93
3.9 Valoración económica de los trabajos realizados.	96
Conclusiones.....	98
Recomendaciones.....	100
BIBLIOGRAFÍA	101

INTRODUCCIÓN

Las fuentes de aguas superficiales son imprescindibles para el desarrollo de las diferentes actividades socioeconómicas llevadas a cabo por los seres humanos. De forma paradójica muchas de estas actividades afectan la calidad de las aguas, incluso aquellas destinadas al consumo humano. Los esfuerzos del hombre por mejorar y elevar su calidad de vida a través del uso de los recursos naturales, en ocasiones causan alteración y deterioro de los mismos, siendo uno de los más afectados los recursos hídricos.

De forma complementaria los cambios de difícil predicción en el clima, sumados al marcado deterioro de las cuencas por causa de la contaminación y deforestación, aumentan la posibilidad de alteraciones repentinas en la calidad del agua de las fuentes utilizadas para el abastecimiento de la población, exigiendo métodos complementarios para su tratamiento. Además de fuentes específicas de contaminación de los ríos, como vertimientos de aguas residuales domésticas e industriales, también se presenta la polución generada por las lluvias que ocasionan el lavado de los suelos, el incremento de la erosión y la resuspensión de los lechos de los ríos.

La evaluación de la calidad del agua cruda debe considerar indicadores representativos que garanticen un análisis integral del recurso hídrico, siendo una de las herramientas más empleadas los índices de calidad del agua (ICA). Como forma de agrupación simplificada engloban varios parámetros en su mayoría físico-químicos y microbiológicos, indicadores de un deterioro en la calidad del agua que permiten reducir la información a una expresión sencilla, el valor arrojado puede ser representativo del nivel de contaminación en la cuenca. En el caso de suministro de agua potable implica diversos aspectos entre los que se encuentra la adecuación de su calidad para consumo humano, permitiendo tomar acciones para su manejo y control mediante los diferentes procesos de potabilización. Para ello se requiere encontrar la forma más conveniente de hacerlo, tanto desde el punto de vista técnico como económico.

Para aguas superficiales se requieren plantas potabilizadoras más complejas, que incluyen procesos como coagulación-floculación, sedimentación, filtración y por supuesto, desinfección con cloro. Para lograr el desarrollo de cada una de estas etapas se hace necesario muchas veces incrementar la cantidad de insumos que se necesitan utilizar, lo que influye a su vez de forma directa en el aumento de los costos para el tratamiento de potabilización.

El río Moa es una de las principales fuentes de agua que abastece a más de 70 000 personas en el municipio de Moa y para uso industrial. Este se encuentra afectado por la acción antrópica: contaminación de las aguas por residuales industriales, escurrimiento superficial, vertimientos urbanos y otros factores contaminantes de origen natural como las precipitaciones y los procesos erosivos. El propósito de determinar el índice de Calidad del Agua (ICA) es estimar el grado de calidad de las aguas del río Moa, para reconocer problemas de contaminación y valorar costos de tratamiento en el proceso de potabilización.

Por tal motivo surge la siguiente investigación titulada: “**Índices de calidad de agua del río Moa y su influencia en los costos para el tratamiento de potabilización**”, que tiene como **problema científico** la necesidad de evaluar la calidad de las aguas del río Moa mediante el índice de calidad (ICA_{sup}) según Montoya et al., 1997.

Objeto de estudio: las aguas del río Moa.

Campo de acción: las propiedades físico-químicas y bacteriológicas de las aguas.

Objetivo general: evaluar el índice de calidad de agua del río Moa para determinar su influencia en los costos para el tratamiento de potabilización.

Hipótesis: si se determina la composición físico-químicas y bacteriológica de las aguas del río Moa, se podrá evaluar el índice de calidad de agua (ICA_{sup}) y su influencia en los costos para el tratamiento de potabilización.

Objetivos específicos:

- ❖ Determinar los factores naturales y antrópicos que influyen en la calidad de las aguas del río Moa.
- ❖ Analizar las propiedades físico-químicas y bacteriológicas de las aguas del río según las normas: NC: 93-11-2.1986, NC: 1021: 2014, NC: 827:2017 y la norma de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2006).
- ❖ Evaluar la calidad de las aguas utilizando el Índice de Calidad de Agua según Montoya (ICAsup).
- ❖ Valorar el consumo de reactivos químicos y los costos para el tratamiento de potabilización de las aguas para consumo humano e industrial.
- ❖ Proponer medidas de prevención y mitigación de la contaminación de las aguas del río Moa

MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

Introducción

Para lograr una investigación exitosa y conocer los trabajos realizados en el mundo sobre esta problemática, es preciso la recopilación de información sobre los estudios más relevantes desarrollados, hipótesis y metodologías establecidas en los últimos años, que permitan actualizar la temática con el objetivo de obtener resultados sobre los estudios de evaluación de la calidad de las aguas a través de los ICA. Para ello es necesario conocer definiciones sobre calidad y contaminación de aguas.

Agua cruda

Es el agua que se encuentra en la naturaleza y que no ha recibido ningún tratamiento para modificar sus características físicas, químicas y microbiológicas (Arizaga Mondragón, 2016).

Agua potable

Agua que no ofrezca peligro para la salud humana por sus características químicas, físicas, biológicas y radiológicas al ser usada como bebida, en la preparación de alimentos, aseo personal y otras actividades que impliquen el contacto directo del agua con los seres humanos (Norma Cubana, 2017).

Agua tratada

Agua procedente de fuente de abasto subterránea o superficial cuya calidad ha sido modificada por procesos de tratamiento (Norma Cubana, 2014).

Contaminación del agua

Se define la contaminación del agua como el vertido en ella de productos diversos, de modo que el agua adquiere unas propiedades tóxicas para los seres que en ella habitan, y se convierte en no apta para el uso a la que la destina el hombre. Generalmente el agua se contamina debido a las actividades humanas.

Los agentes contaminantes del agua son del tipo biológico, químico y físico. Los contaminantes biológicos corresponden a desechos orgánicos, tales como la materia fecal y restos de alimentos, estos llegan a los ríos, lagos o mares a través

de los alcantarillados de las ciudades. Poseen la propiedad de fermentar, es decir, se descomponen en presencia del oxígeno disuelto del agua, estos desechos orgánicos de tipo biológico son biodegradables.

Los contaminantes químicos son compuestos químicos, orgánicos e inorgánicos, que llegan al agua proveniente de las actividades domésticas, industriales y agropecuarias. Están formados por hidrocarburos derivados del petróleo, plaguicidas, aceites, detergentes, no suelen ser biodegradables por lo que permanecen en el agua mucho tiempo después de su vertido.

Los contaminantes físicos también están formados por vertidos de líquidos calientes y sustancias radioactivas provenientes de hospitales, laboratorios y centrales nucleares (Fernández Rodríguez, 2003).

Costo

Todo desembolso o gasto de dinero para la elaboración de un producto o prestación de un servicio (Dumagualla et al., 2014).

Potabilización

La potabilización del agua consiste en la eliminación de compuestos volátiles seguida de la precipitación de impurezas con floculantes, filtración y desinfección con cloro (Idrovo, 2010).

Tratamiento convencional

Tratamiento de agua que se ejecuta para aguas superficiales, ríos, arroyos y embalses, en el cual se aplican los procesos de: floculación, sedimentación, filtración y desinfección (Norma Cubana, 2017).

Índices de calidad de las aguas (ICA)

Los ICA, resumen y simplifican, en un único valor numérico, el cúmulo de información disponible sobre la calidad del agua. Estos índices facilitan el manejo de datos, evitan que las fluctuaciones en las mediciones invisibilicen las tendencias ambientales y permiten comunicar, en forma simple y veraz, la condición del agua para un uso deseado o efectuar comparaciones temporales y espaciales entre cuerpos de agua. Por lo tanto, resultan útiles o accesibles para

las autoridades políticas y el público en general (Pérez Castillo y Rodríguez, 2008).

Actualmente los ICA tienen alta aceptabilidad dentro de las investigaciones hídricas ya sea para estudios de aguas subterráneas como superficiales. Diversos autores utilizan los ICA como parámetro fundamental para el desarrollo de sus trabajos de investigación, pero la evaluación general de la calidad del agua ha sido objeto de múltiples discusiones en cuanto a su aplicación para la regulación del recurso hídrico en el mundo ya que considera criterios que no siempre garantizan el resultado esperado para regiones con diferentes características.

Como consecuencia, muchos países han desarrollado estudios e indicadores tendientes a aplicar criterios de evaluación propios, de tal manera que su aplicabilidad corresponda con sus requerimientos y necesidades. Los países con más utilización de los ICA en estudios hídricos son: Estados Unidos, Canadá, México, Colombia, Brasil, Europa, países de Centro América y otros. En Cuba la aplicación de los ICA es minoritaria con respecto a la utilización que tienen en otros países como los mencionados anteriormente.

Las variables más utilizadas para la determinación de los Índices de Calidad del Agua son: color, turbidez, coliformes totales, coliformes fecales o termotolerantes, pH, demanda biológica de oxígeno (DBO_5), demanda química de oxígeno (DQO), temperatura, sólidos totales disueltos, sólidos suspendidos, y conductividad. Algunos de sus conceptos se citan a continuación:

Color: el color no se puede atribuir a ningún constituyente en exclusivo, aunque ciertos colores en aguas naturales son indicativos de la presencia de determinados contaminantes. La coloración del agua natural no contaminada está causada principalmente por la presencia de sustancias húmicas que le proporcionan al agua el color amarillo; compuestos de hierro le dan color rojizo así como tonalidades oscuras (negras) son debidas a la presencia de manganeso (De Miguel Fernández, 2012).

Turbidez: se define como la propiedad óptica de una suspensión que hace que la luz se disperse y no se transmita a través de la suspensión (Martínez, 2006).

Coliformes totales: bacilos Gram negativos, aerobios o anaerobios facultativos, no esporulados, oxidasa negativos, capaces de crecer en presencia de sales biliares o agentes tensoactivos que fermentan la lactosa con producción de ácido y gas a $(35,0 \pm 0,5)$ °C de 24 horas a 48 horas y que pueden presentar actividad de la enzima β -galactosidasa. La mayoría de las bacterias del grupo coliforme son de los géneros *Escherichia*, *Citrobacter*, *Klebsiella* y *Enterobacter* pertenecientes a la familia Enterobacteriaceae. Sus resultados se expresan en Número Más Probable (NMP) cuando se determina por la técnica de tubos múltiples de fermentación.

Coliformes termotolerantes: subgrupo de las bacterias del grupo coliforme que fermentan la lactosa a $(44,0 \pm 0,2)$ °C en 24 horas siendo *Escherichia coli* el principal representante. Sus resultados se expresan de igual forma que los coliformes totales (Norma Cubana, 2017).

Demanda biológica de oxígeno (DBO₅): corresponde a la cantidad de oxígeno necesario para descomponer la materia orgánica por acción bioquímica aerobia. Se expresa en mg/L. El cálculo se efectúa mediante la determinación del contenido inicial de oxígeno de una muestra dada y lo que queda después de cinco días en otra muestra semejante, conservada en un frasco cerrado a 20 °C. La diferencia entre los dos contenidos corresponde a la DBO₅ (Arizaga Mondragón, 2016).

Demanda química de oxígeno (DQO): es la cantidad de oxígeno consumido por las materias existentes en el agua, oxidables en condiciones determinadas. Esta medida es una estimación de las materias oxidables presentes en el agua, cualquiera que sea su origen, orgánico y mineral (De Miguel Fernández, 2012).

CAPÍTULO I: CARACTERÍSTICAS FÍSICO- GEOGRÁFICAS, GEOLÓGICAS REGIONALES Y PARTICULARES DEL ÁREA DE ESTUDIO.

1.1 Introducción

En el presente capítulo se describen los principales rasgos físicos- geográficos, geomorfológicos, tectónicos, hidrogeológicos, climáticos y geológicos del sector analizado lo cual permite conocer de forma general el área de estudio.

1.2 Ubicación geográfica del área de estudio.

El río Moa es uno de los principales ríos del territorio, de los cuales se extrae el agua que abastece una parte de la población. El caudal del río está regulado primero por la Presa Nuevo Mundo y posteriormente por la Derivadora Moa. La Planta de Tratamiento de Agua Potable pertenece a la Empresa Ernesto Che Guevara, está ubicada a 5 km al sureste del pueblo de Moa, al norte limita con la fábrica Pedro Soto Alba, al sur con la mina de esta misma fábrica, al este con el poblado de Veguita y al oeste con una zona minera desértica. (Figura 1.1).

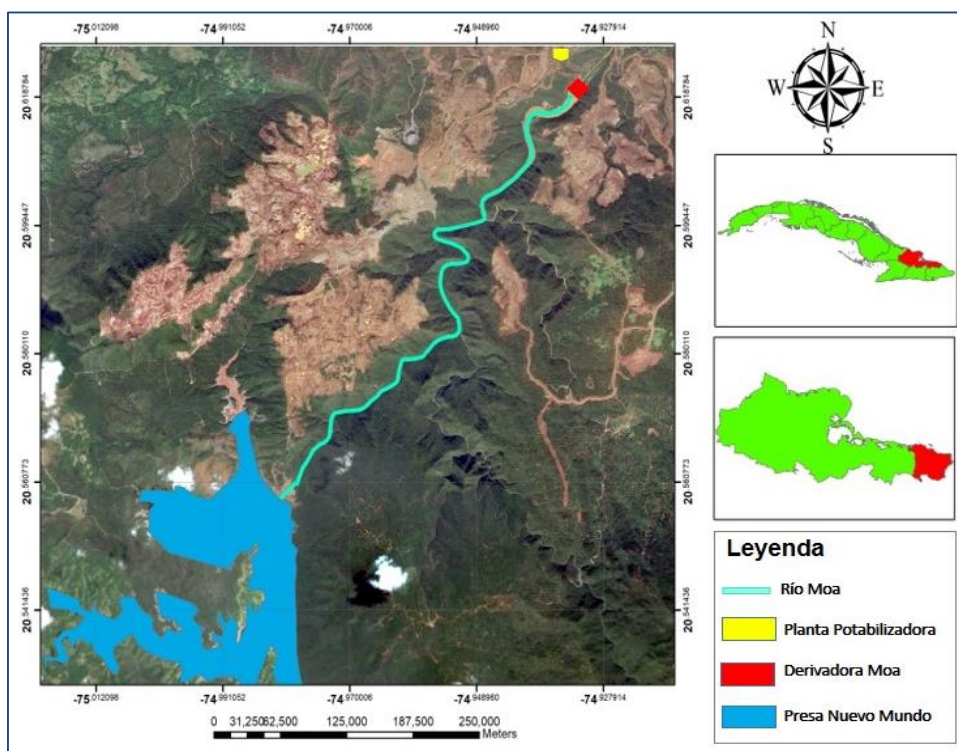


Figura 1.1 Ubicación del área de estudio.

m/seg de velocidad y los gastos oscilan entre 100 y 200 L/seg algunos pueden tener gastos inferiores (Viltres Milán, 2011).

Según la extensión superficial de las cuencas hidrográficas los ríos más importantes son el río Moa, con un área de 156 km² y los ríos Cayo Guam, Cabañas, Quesigua, Yagrumaje, Yamanigüey y Punta Gorda con cuencas hidrográficas muy inferiores, pues ninguna supera los 100 km².

Debido al régimen de precipitaciones, particularidades hidrogeológicas regionales, características de las rocas acuíferas y parámetros hidrogeológicos existentes en el territorio, se considera como una zona de elevada complejidad hidrogeológica. Con la existencia de cinco complejos acuíferos fundamentales, a partir de la caracterización del tipo de rocas presentes y de su capacidad para el almacenamiento de aguas subterráneas que se describen a continuación:

Complejo acuífero de las ofiolitas: se extiende en dirección noroeste-sudeste, al oeste del río Moa. Litológicamente se encuentra constituido por serpentinitas alteradas, peridotitas serpentinizadas y piroxenitas. La capacidad acuífera ha sido poco estudiada; su profundidad de yacencia es de 1.3 – 12 metros. El coeficiente de filtración (K) oscila entre 1 - 14.7 m/día, el gasto de aforo (Q) entre 1.2 – 4 L/s.

Complejo acuífero de los sedimentos costeros: se extiende por casi todo el norte del área, forma una franja estrecha que presenta dimensiones de 1 - 2 km. de ancho. El relieve es costero con cotas de 0 – 2 m sobre el nivel del mar; su edad se corresponde con el Cuaternario. Su composición litológica integrada por depósitos arcillosos contiene fragmentos angulosos de composición múltiple. Las rocas acuíferas se asocian a calizas organógenas, en menor escala sedimentos no consolidados, así como, depósitos arcillo - arenosos con fragmentos angulosos de composición variada. Predominan aguas cársticas y de grietas, y en algunos casos intersticiales. Por lo general tienen interrelación hidráulica con el agua de mar. A una profundidad comprendida entre los 1 - 5 m yace el nivel freático. El coeficiente de filtración (K) de estas rocas alcanza valores hasta los 268.4 m/días, el gasto (Q) es aproximadamente de 14 L/seg.

Complejo acuífero de los sedimentos aluviales: se extiende en dirección norte-sur formando una franja ancha en su parte inferior, y estrecha en la superior, ocupa prácticamente la totalidad de las terrazas de los ríos más importantes, así como, los valles de sus afluentes. Constituido por gravas, arenas, cantos rodados y arenas arcillosas, con 15 m de potencia aproximadamente, estos sedimentos son de edad cuaternaria y se caracterizan por su alta capacidad para el almacenamiento de agua. El coeficiente de filtración (K) varía de 13 - 290 m/día, mientras que su gasto de aforo (Q) oscila entre 2 - 57 L/seg. Estas aguas yacen a una profundidad comprendida entre los 1 - 5 m.

Complejo acuífero de las lateritas: se extiende por casi toda la zona de Moa ocupando gran parte del área. Su composición litológica se corresponde con potentes cortezas de intemperismo, representa a un acuitardo, debido al predominio de aguas capilares y de potencias considerables de lateritas que alcanzan los 30 m, con un marcado desarrollo de procesos de capilaridad, donde los ascensos capilares de las aguas pueden alcanzar alrededor de 20 m. Las precipitaciones atmosféricas son la fuente principal de alimentación de estas aguas.

Complejo acuífero de los sedimentos terrígenos – carbonatados: aparece este complejo sólo en una pequeña porción al norte del poblado de Cañete. Constituido geológicamente por margas estratificadas, calizas compactas, depósitos brechosos de carácter tanto tectónico como sedimentarios, aleurolitas y conglomerados. Las rocas acuíferas se corresponden con los conglomerados brechosos y las calizas, y en menor medida, con las margas estratificadas.

1.4 Clima

El clima de la zona es del tipo tropical húmedo, con abundantes lluvias, influenciado por la orografía. Las montañas del grupo Sagua-Baracoa sirven de barrera a los vientos Alisios del noreste, los cuales descargan toda su humedad en forma de abundantes precipitaciones en la parte norte.

1.4.1 Precipitaciones

La distribución de las precipitaciones se caracteriza por dos períodos de lluvia, (mayo - junio) y (septiembre - enero) y dos períodos de seca (febrero - abril) y (julio - agosto). Los pluviómetros utilizados para analizar el comportamiento de las precipitaciones están ubicados en la Derivadora Moa, en la Presa Nuevo Mundo y en Cayo Grande de Farallones.

En el periodo evaluado (2013-2018) las precipitaciones presentan un valor anual que oscilan entre 1720,2-3265.3 mm. En los cinco años evaluados, el mayor y menor valor de precipitaciones corresponden con los meses de enero (703.57mm) y junio (43.17mm) respectivamente en el año 2018.

En la Figura 1.3 se muestra el promedio de precipitaciones mensuales de la serie temporal de los años 2013, 2014, 2015, 2016, 2017 y 2018, tomado del registro de precipitaciones de la Oficina de Recursos Hidráulicos del municipio de Moa, correspondiente a los pluviómetros ubicados en la Derivadora Moa, Presa Nuevo Mundo y Cayo Grande de Farallones.

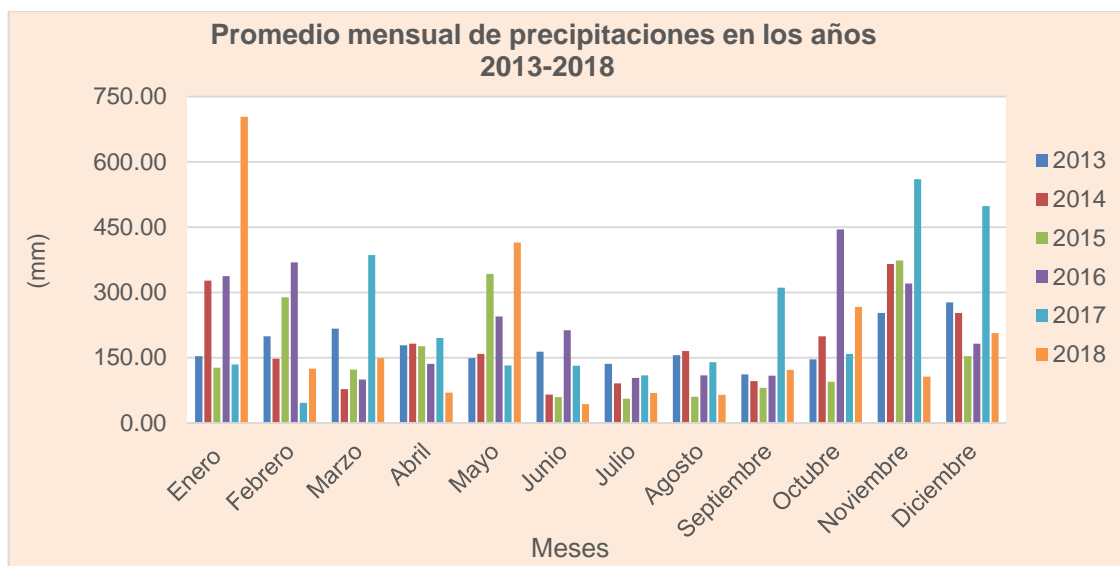


Figura 1.3. Promedio de mensual de precipitaciones desde el 2013 hasta el 2018. Valores tomados del registro de precipitaciones de la Oficina de Recursos Hidráulicos del municipio de Moa, correspondiente a los pluviómetros ubicados en la Derivadora Moa, Presa Nuevo Mundo y Cayo Grande de Farallones.

1.4.2 Humedad y evaporación

La humedad relativa media anual es de 85%, los meses de mayor humedad son diciembre con un 94%, noviembre con un 86% y octubre con un 90%. Siendo estos tres meses el período de mayor humedad relativa del territorio. La evaporación anual presenta valores entre 2200 - 2400 mm; los meses de julio y agosto son los más secos.

1.4.3 Vientos

Los vientos son de moderada intensidad, en superficie presentan dirección noreste-este fundamentalmente. La distribución de frecuencia anual de la dirección e intensidad del viento durante el año muestra que el sur es la más notable, con un 37.41 %, seguido de los vientos de sentido norte-este con 32.52%, mientras que el resto de las direcciones poseen una frecuencia inferior al 10 %, siendo la dirección oeste la de menor ocurrencia, con un 0.41% (Fernández Fiz, 2016).

1.5 Geomorfología regional

Orográficamente el territorio moense se caracteriza por una alta complejidad, con predominio del relieve de montaña hacia la parte este, con cota máxima de 1139 m sobre el nivel del mar (El Pico Toldo); y ondulado hacia el norte, zona correspondiente a la región costera. La zona montañosa se caracteriza por valores de pendientes que sobrepasan los 450 m y valores máximos de isobasitas de 900 m en el segundo orden y 800 m en el tercero (Polanco Almaguer, 2012).

En el territorio aparecen diversas formas del relieve, en el que tienen mayor relevancia la zona de llanuras (Figura 1.4). El área de estudio se encuentra enmarcada en las zonas geomorfológicas de montañas bajas aplanadas, montañas bajas direccionadas y llanuras fluviales erosivas acumulativas.

Mapa Geomorfológico Escala 1: 50 000.

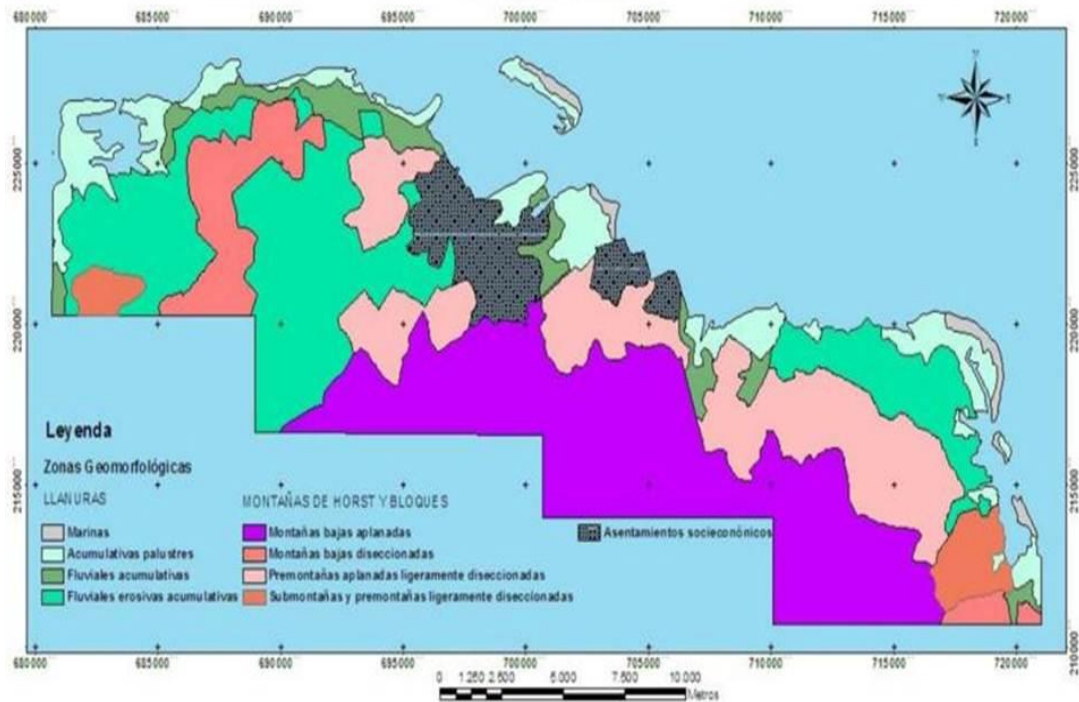


Figura 1.4. Mapa geomorfológico de Moa .Tomado de (Polanco Almaguer, 2012).

El sector de estudio se ubica en el Bloque El Toldo, el cual ocupa la posición central del municipio y es el de máxima extensión, correspondiéndole también los máximos valores del levantamiento relativo de la región. Litológicamente está conformado en superficie por las rocas del complejo máfico y ultramáfico de la secuencia ofiolítica, sobre las cuales se ha desarrollado un relieve de montañas bajas de cimas aplanadas ligeramente disecionadas (Rodríguez Infante, 2007). (Figura 1.5).

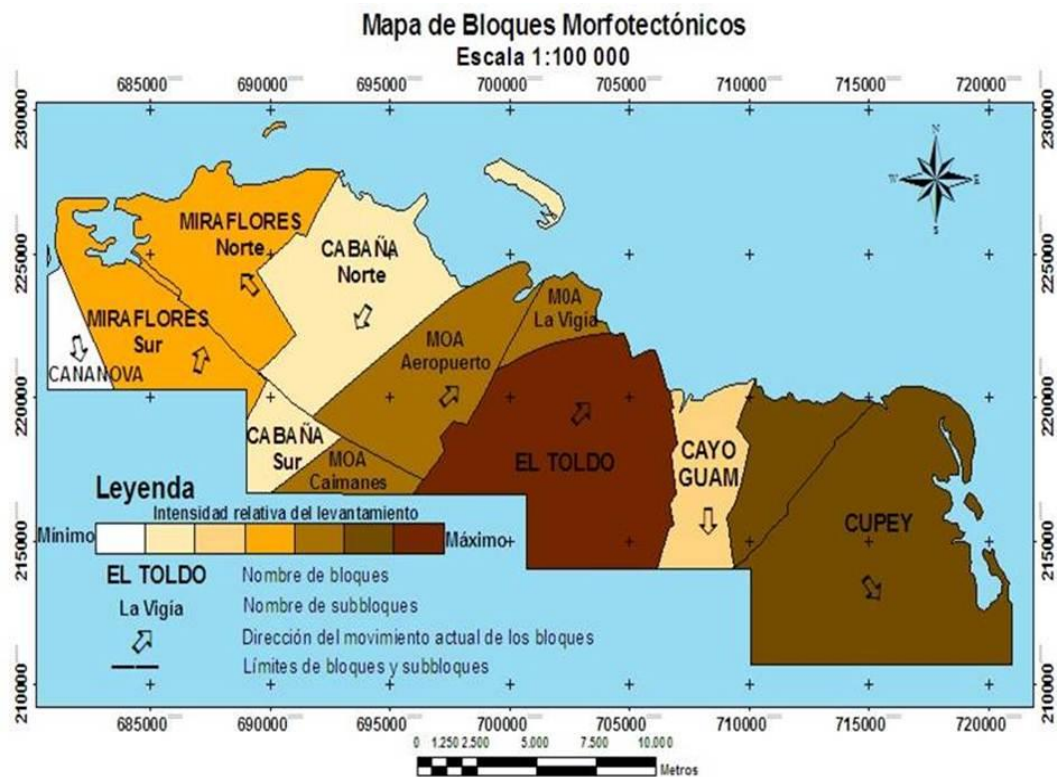


Figura 1.5. Mapa de Bloques Morfotectónicos del municipio Moa. Tomado de (Polanco Almaguer, 2012)

1.6 Geología regional y local

El municipio Moa se encuentra ubicado en el complejo ofiolítico Mayarí-Baracoa, el cual se localiza en el extremo oriental de la provincia Holguín. En este macizo se pueden distinguir diferentes mantos de cabalgamiento, en los que se aprecian espejos de fricción y escamas tectónicas de diferentes espesores.

La geología del municipio Moa se describe según la información del esquema geológico, escala original 1:50 000 (Figura 1.6).

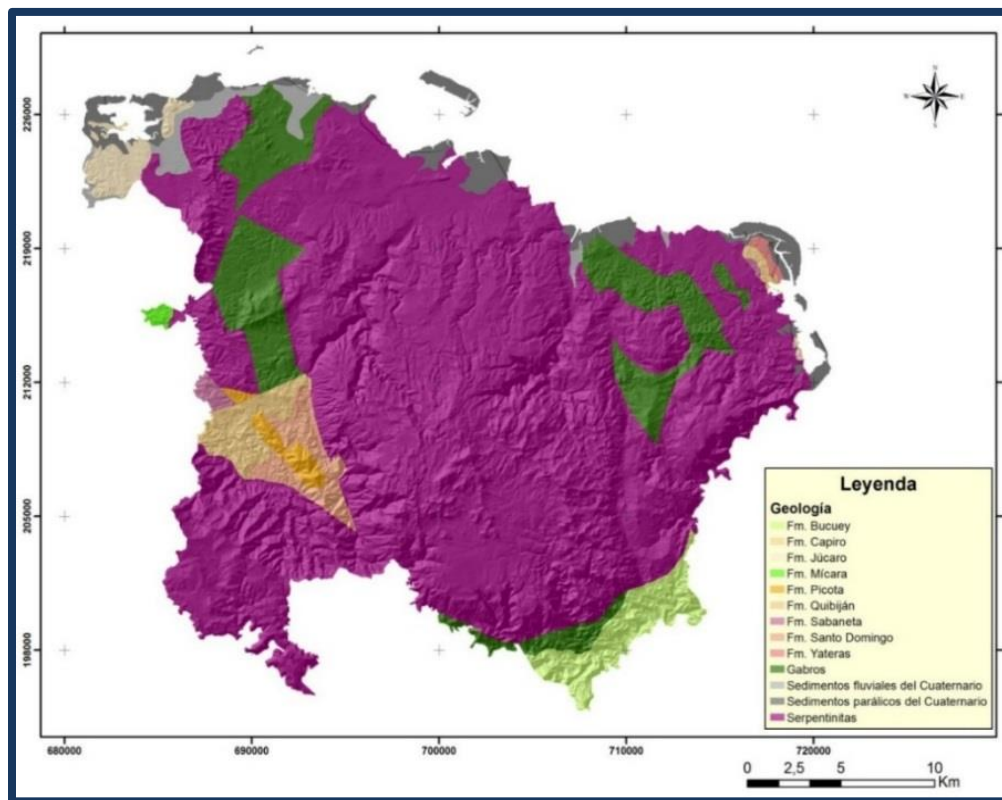


Figura 1.6. Esquema geológico del territorio de Moa. (Escala original 1:50 000). Tomado de (Rodríguez Infante, 1998).

Formación Yateras (Oligoceno inferior - Mioceno inferior parte baja): alternancia de calizas biodetríticas y detríticas, y calizas biógenas de grano fino a grueso, con estratificación fina a gruesa o masiva, duras, de porosidad variable, a veces aporcelanadas que frecuentemente contienen grandes foraminíferos (*Lepidocyclinas*). Coloración por lo general blanca, crema o rosácea, y con menos frecuencia carmelitas.

Formación Sierra de Capiro (Eoceno superior): secuencia de limolitas calcáreas, micáceas, con estratos poco definidos, de color parduzco, con intercalaciones de conglomerados con fragmentos de calizas arrecifales, serpentinitas y rocas volcánicas. Las rocas presentan estratificación gradacional.

Formación Bucuey (Cretácico): constituida por tobas y lavobrechas, tufitas, argilitas, limolitas, lavas, conglomerados y calizas.

Formación Sabaneta (Paleoceno inferior, Daniano, parte alta - Eoceno medio): está constituida por rocas vulcanógenas-sedimentarias de granos finos,

frecuentemente zeolitizadas, con intercalaciones de calizas, silicitas, tobas cloritizadas y rara vez basaltos. En la zona de Farallones el corte está compuesto por tobas vitroclásticas y cristalolitoclásticas zeolitizadas, tobas vítreas y tobas cineríticas. Las calizas tobáceas y tufitas aparecen regularmente hacia la parte alta de la formación. En Los Indios de Cananova, en la base de la formación se intercalan areniscas de granos gruesos y algunas brechas, donde fueron encontrados fósiles que indican una edad Paleoceno-Daniano. Aflora en un área extensa de la región de Cananova hasta Farallones y en un pequeño bloque en Yamanigüey. Perteneciente a las cuencas superpuestas o piggyback de la segunda generación aflora en el área de la Sierra de Capiro.

Formación Santo Domingo (Cretácico inferior (Aptiano) - Cretácico superior (Turoniano): se caracteriza por el dominio del componente piroclástico en el corte, con intercalaciones de litofacies terrígenas finas, silicitas, tufias, efusivos principalmente de composición andesítica-basáltica y andesítica, raramente hasta dacíticas, con la presencia de cuerpos de dioritas, dioritas cuarcíferas, gabrodioritas, gabrodiabas y diabasas, con desarrollo limitado de rocas esquistosas calcáreas, calizas y corneanas. Aflora en la región de Farallones-Calentura y en una pequeña área en la localidad de Centeno.

Formación Mícara: por su composición, esta unidad se puede dividir en tres partes: inferior, media y superior. La parte inferior está constituida por limolitas masivas, mal estratificadas; brechas; areniscas; arcillas y calizas. La parte media se compone de una secuencia olistostrómica compuesta por margas, areniscas, limolitas, gravelitas y conglomerados. Los olistolitos son de brechas y ultrabasitas serpentinizadas. La estratificación es buena. En la parte superior predominan las limolitas y subordinadamente brechas y areniscas tobáceas, en su parte más alta, con intercalaciones de tobas ácidas bentonitizadas y calizas. Presentan buena estratificación. Las areniscas, limolitas, brechas, gravelitas y conglomerados son polimícticos. Las calizas son biodetríticas, arenosas y brechosas. Algunas veces, en la parte alta de la formación las areniscas y limolitas tienen un contenido alto de tobas vitroclásticas y cristaloclásticas y de tufitas psammíticas.

Formación La Picota: constituida por intercalaciones de areniscas polimícticas y conglobrechas mal seleccionadas que se intercalan con argilitas.

Gabros del Complejo Ofiolítico: los cuerpos de gabros forman grandes bloques y diques incluidos en el macizo ofiolítico, cuyos contactos con los otros tipos litológicos son generalmente tectónicos, las dimensiones de los cuerpos de gabros varían de uno a tres kilómetros de ancho y de 10 a 15 kilómetros de longitud. Se estima que presentan un espesor medio de 500 metros. Muchas veces los cuerpos de gabros están sobrecorridos por las rocas ultramáficas, fundamentalmente peridotitas.

Rocas Serpentinizadas del Complejo Ofiolítico: constituidas por harzburgitas y peridotitas. Se han datado con una edad de Jurásico-Cretácico temprano. Se considera que estas rocas serpentinizadas poseen un espesor superior a los 1000 metros, se presentan en forma de escamas tectónicas muy fracturadas.

Formación Júcaro: está constituida por calizas margosas poco consolidadas y a veces por margas de edad Oligoceno-Mioceno. Aflora por toda la costa en la región de Cananova y Yamanigüey.

Depósitos del Cuaternario Río Macío (Holoceno): están integrados por materiales aluviales de las terrazas de los ríos Moa, Cabañas y Cayo Guam, aparecen ocho capas de estrato. Están formados por sedimentos arenosos, areno-arcillosos y conglomerados, estos últimos conforman fragmentos de rocas ultramáficas serpentinizadas (peridotitas y harzburgitas). Mineralógicamente se pueden describir por la presencia de óxido e hidróxido de hierro y aluminio. Los minerales de hierro son hematita, goethita, magnetita, y de aluminio principalmente gibbsita. Las arcillas están representadas por montmorillonita. En la parte superior del perfil aparecen materiales orgánicos.

1.7 Tectónica regional

Desde el punto de vista geotectónico, en el área existen cuatro sistemas principales de fallas, (Rodríguez infante, 1998), (Figura 1.7). El sistema más antiguo de los reflejados actualmente en la superficie tiene su origen asociado al

cese de la subducción que generó la colisión entre el arco insular y el margen continental, se origina el emplazamiento del complejo ofiolítico, por lo cual las fallas de este sistema se encuentran espacial y genéticamente relacionadas con los límites de los cuerpos máficos y ultramáficos dentro del complejo.

Un ejemplo de estas estructuras es la falla ubicada al sur de Quesigua, al este del río de igual nombre, que pone en contacto las serpentinitas ubicadas al norte con los gabros que afloran al sur, así como las fallas que en El Lirial Abajo, Peña y Ramírez y Caimanes Abajo ponen en contacto a las serpentinitas con las rocas de las formaciones La Picota, Mícara y Quibiján respectivamente. Estas fallas, en su mayoría se encuentran pasivas lo que se demuestra por su pobre reflejo en el relieve, pudiendo notarse su presencia fundamentalmente por el contacto alineado y brusco entre litologías diferentes.

Excepción de lo anterior lo constituye la falla ubicada al sur de Quesigua que aún se refleja a través de un escarpe pronunciado arqueado, con su parte cóncava hacia el norte que sigue la línea de falla, lo que se considera está asociado a la actividad geodinámica actual del sector, que es considerado uno de los más activos dentro del territorio (Rodríguez Infante, 1998).

El segundo sistema y de mayor importancia en el territorio está constituido por fallas de dos direcciones: noreste y norte - noroeste que se desplazan mutuamente y se cortan entre sí, constituido por las dislocaciones más abundantes y de mayor extensión de la región, que indistintamente afectan todas las litologías presentes y son a su vez los límites principales de los bloques morfotectónicos. Su origen se encuentra asociado al proceso de colisión del Arco Volcánico del Cretácico sobre el Paleomargen de Bahamas en el Eoceno Medio. Las principales estructuras representativas de este sistema son las fallas Los Indios, Cayo Guam, Moa, Cabaña, Quesigua, Miraflores y Maquey.

Falla Los Indios: se extiende desde la parte centro meridional del área al oeste de Cayo Chiquito, atraviesa el norte de la Bahía de Cananova y se refleja dentro de la zona nerítica marina a través del desplazamiento de la barrera arrecifal y los depósitos litorales. En varios puntos esta estructura aparece cortada y desplazada por fallas de dirección norte-noreste. Su trazado es en forma de una línea curva

cóncava hacia el oeste-sudoeste con un rumbo que oscila entre los 10° y 30° oeste en los diferentes tramos que la conforman.

Falla Cayo Guam: Con una dirección N15°W, se extiende desde la parte alta del río de igual nombre, sigue con nitidez hasta Punta Yagrumaje. Al igual que la falla Los Indios, esta estructura aparece cortada y desplazada en varios tramos por fallas de dirección noreste y sublatitudinales.

Falla Moa: dentro del territorio es la estructura de mayor extensión y su trazo corresponde con una línea cóncava hacia el este con el arco mayor en la zona de Calentura, se hace más recta hacia el norte con una dirección de N48°E, mientras que en su parte meridional tiene un rumbo N25°W. En la parte norte esta estructura se bifurca en dos tramos, uno de rumbo N35°E denominado La Vigía y el otro de rumbo N74°E nombrado La Veguita, el que atraviesa la zona marina perilitoral, hasta cortar la barrera arrecifal a la cual limita y afecta, pues en el bloque oriental de la falla la barrera como tal desaparece, quedando reflejada sólo como un banco de arenas, lo que constituye un indicador del sentido de los desplazamientos.

Falla Cabaña: se extiende desde el extremo centro occidental del área, al noroeste del poblado de Peña y Ramírez hasta el norte de la ciudad de Moa, corta la barrera arrecifal y limita el extremo oriental de Cayo Moa Grande. En su parte meridional presenta una orientación N70°E hasta la zona de Zambumbia donde es truncada por un sistema de fallas submeridionales, aflora nuevamente con nitidez al nordeste del poblado de Conrado donde inicia su control estructural sobre el río Cabaña. En las cercanías de Centeno esta estructura es cortada y desplazada por la falla Cananova, donde toma una orientación N56°E la que mantiene hasta penetrar en el océano Atlántico.

Falla Quesigua: se expresa a través de un arco con su parte cóncava hacia el este nordeste, se mantiene en su parte septentrional, donde su trazo es más recto un rumbo N10°E y en la meridional, N40°W. Se extiende desde la barrera arrecifal hasta interceptar el río Jiguaní.

Falla Miraflores: se extiende en forma de arco cóncavo hacia el este-noreste con un trazo casi paralelo a la falla Moa, con un rumbo N25°W desde el límite sur del área hasta Cayo Chiquito y desde aquí hasta Punta Majá con una orientación N35°E. Su límite meridional al parecer lo constituye la falla Moa al sur del área de trabajo.

Falla Maquey: limita y contornea las estribaciones septentrionales de la Sierra del Maquey. Aflora desde la zona de Hato Viejo hacia el sur de La Colorada, asumiendo un rumbo N65°E por más de siete kilómetros hasta Calentura abajo donde se cruza con las fallas Moa y Caimanes. En su parte más occidental mantiene una orientación N78°E siendo cortada y desplazada por estructuras de orientación noroeste.

El tercer sistema de estructuras está constituido por dos fallas de tipo strike-slip denominadas Cananova y El Medio. Por la posición que ocupan, orientación y componentes fundamentales de los desplazamientos no tienen similitud con las fallas antes mencionadas y su origen corresponde al Mioceno medio, cuando se inician los movimientos hacia el este de la placa Caribeña a través de la falla Oriente, lo que desarrolla un campo de esfuerzo que provoca la compresión del bloque oriental cubano en la zona de sutura de éste con la Plataforma de Bahamas, lo que originó la ruptura y el acomodamiento de la corteza.

Falla Cananova: presenta un rumbo predominante N53°W. Es cortada en diferentes puntos por estructuras submeridionales, se caracteriza toda la zona de falla por el grado de cizallamiento de las rocas que corta.

Falla El Medio: con un rumbo aproximado de N40°E. Al igual que la Falla Cananova, origina un alto cizallamiento de las rocas a través de todo su trazo.

El cuarto sistema de fracturas corresponde a estructuras sublongitudinales que aparecen en toda el área pero que tienen su máxima expresión en las zonas periféricas de los sectores de máximo levantamiento, como por ejemplo las fallas a través de las cuales corren algunos tributarios como el arroyo La Veguita del río Moa, el arroyo La Vaca, arroyo Colorado al oeste del Cerro Miraflores y la de

mayor envergadura que se encuentra al sur de Caimanes, lo cual permite considerar su origen asociado a procesos de descompresión o expansión de bloques al disminuir las tensiones horizontales que mantienen cohesionados los macizos rocosos debido a los movimientos verticales diferenciales, lo que justifica la ausencia de desplazamientos geológicos y geomorfológicos apreciables. La edad de este sistema es considerado post Mioceno, cuando se inicia el proceso de ascenso definitivo del territorio actual de Cuba Oriental.

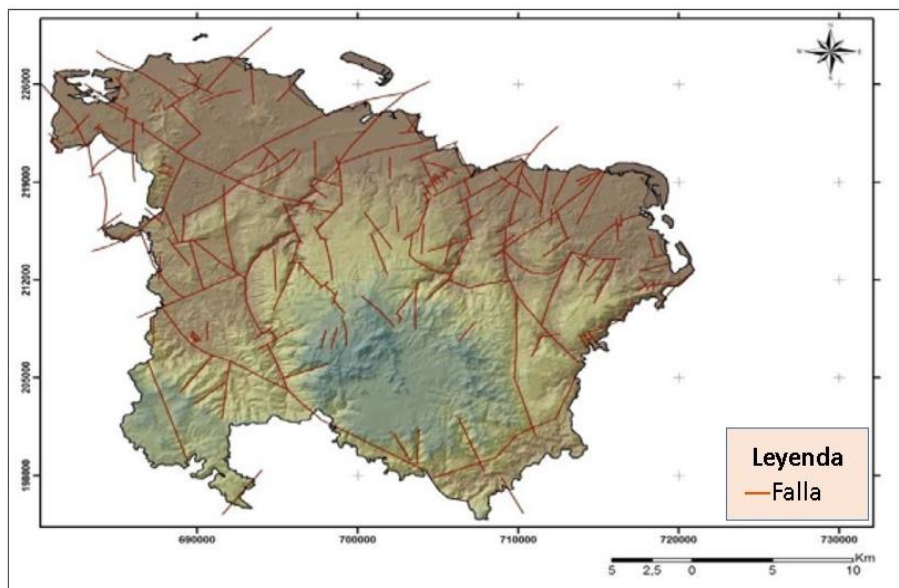


Figura 1.7. Mapa tectónico de Moa. Escala original 1:50 000 (Viltres Milán, 2011).

1.8 Vegetación regional

El municipio forma parte del sistema montañoso Moa – Baracoa, éste representa la zona de mayor biodiversidad del país con un 68% de especies autóctonas. La vegetación más exuberante se ubica hacia la franja montañosa, de 363 kilómetros cuadrados, buena parte del Parque Nacional Alejandro de Humboldt, área protegida y Patrimonio de la Humanidad.

El municipio de Moa tiene una situación particular, la vegetación del mismo es muy característica, por lo que ha evolucionado una flora muy típica que comprende el 33 % de todos los endemismos cubanos, en la cual se encuentran pinares, pluvisilvas charrasco y bosques de galerías. La vegetación de estos suelos se mantiene por la elevada humedad y por los mecanismos de conservación de los

nutrientes que los mismos han desarrollado, predominando el *pinus cubensis* y plantas latifodias, endémicas de la región.

Además se pueden observar ejemplares del bosque de pluvisilvas, típico de selvas lluviosas, es una formación vegetal de constitución vigorosa que puede alcanzar hasta 40 m de altura y se implanta sobre cortezas lateríticas.

El área de estudio se encuentra cerca de las áreas de minería, existen afectaciones en zonas próximas a la cuenca con áreas deforestadas por la actividad minera principalmente en la zona media y baja de la cuenca. En la zona alta de la cuenca la vegetación se caracteriza por un endemismo conformado por *Pinus Cubensis*, *Jacarandá Arbóreo* (Abey, Framboyán azul), *Clusia Rosea* (Copey), *Cacaloba Shafan* (Uvilla), *Bactris Cubensis* (Pajua) y *Arthrostylidium ssp* (Tibisí). En la zona media y baja existen áreas con escasa vegetación. Figura 1.8.



Figura 1.8. Vegetación típica del territorio de Moa.

1.9 Características socioeconómicas regionales y locales

El municipio Moa se caracteriza por la presencia de extensas cortezas de meteorización, que permite el desarrollo de la minería y metalurgia en la región y por ende su crecimiento económico, social y cultural. En 1963 se crea el municipio de Moa perteneciente a la región minera de la provincia de Oriente y en 1976 por división política administrativa, pasa a la provincia de Holguín. Hoy, Moa cuenta con varios centros de enseñanza, hospitales, hoteles, un aeropuerto y otras

instalaciones que favorecen el desarrollo económico, social y cultural en el municipio. Cuenta además con las plantas procesadoras de níquel Comandante Pedro Sotto Alba y Ernesto Che Guevara. La ciudad y las instalaciones mineras son visitadas por intereses económicos, solo algunos espacios son utilizados para fines turísticos y ecológicos.

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA Y VOLÚMENES DE LOS TRABAJOS REALIZADOS

2.1 Introducción

El presente capítulo contiene la metodología empleada para realizar la evaluación de la calidad de las aguas del río Moa a través de tres etapas fundamentales (Figura 2.1.):

- **Etapas I: Búsqueda y revisión bibliográfica.**
- **Etapas II: Trabajo de campo y de laboratorio.**
- **Etapas III: Trabajo de gabinete.**

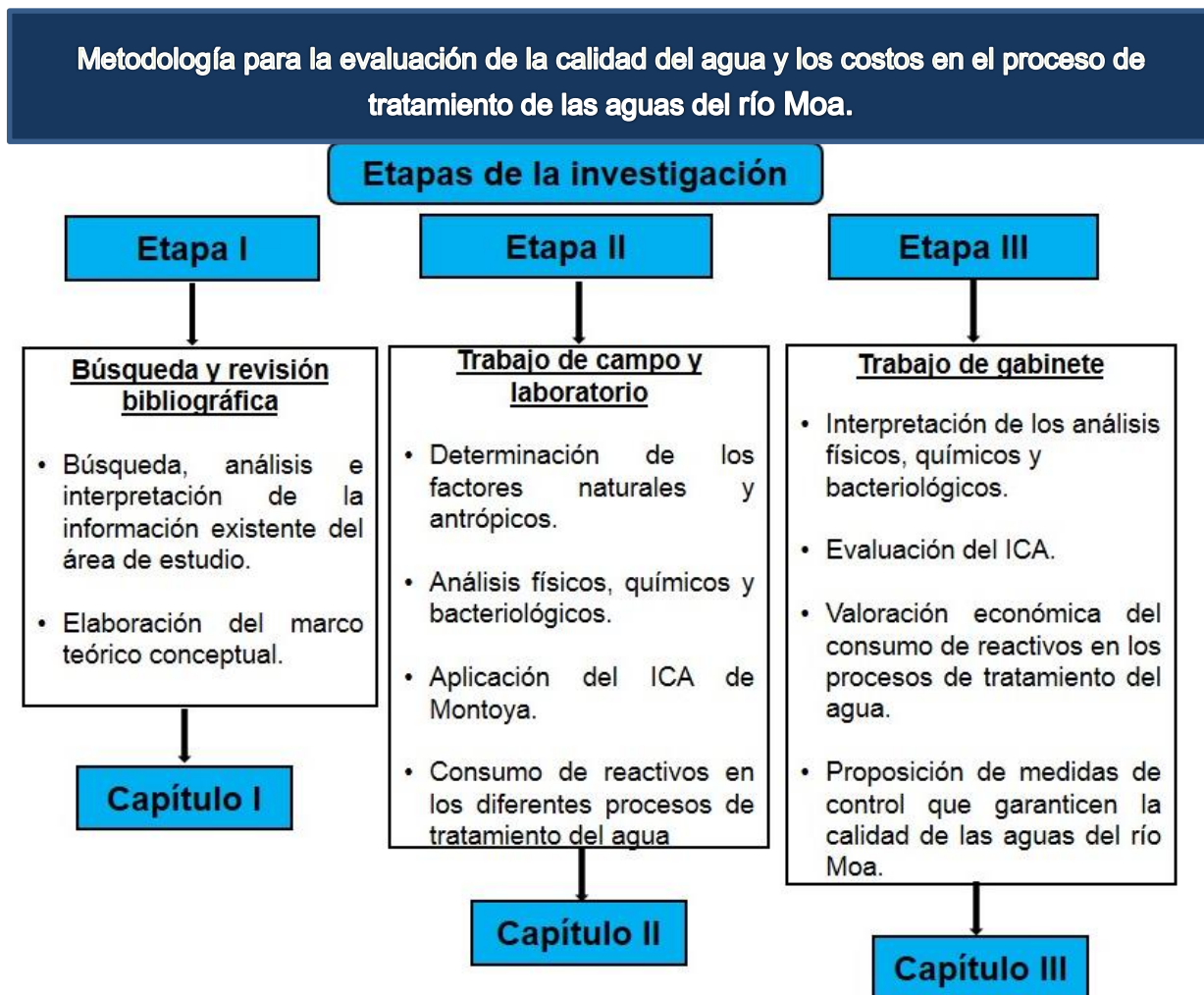


Figura 2.1. Flujograma de la investigación.

Para dar cumplimiento a los objetivos propuestos se trazaron varias tareas, las cuales fueron cumplidas satisfactoriamente. A continuación, se describen las tres etapas de trabajo.

2.2 Etapa I. Búsqueda y revisión bibliográfica

En esta etapa se realizó la búsqueda y revisión bibliográfica, se consultaron una serie de artículos científicos, trabajos de diploma, tesis de maestrías, doctorados y otros documentos, con el objetivo de obtener la mayor cantidad de información posible. Se consultó bibliografía especializada a nivel nacional e internacional sobre estudios de contaminación de aguas superficiales, control y análisis de aguas de consumo humano; así como las exigencias y normas establecidas para su tratamiento. También se consultó bibliografía actualizada sobre metodologías utilizadas para el cálculo de índices de calidad de aguas superficiales, lo que permitió conocer las vías más idóneas para la realización de la investigación.

Dentro de las investigaciones internacionales se destacan una serie de trabajos encaminados al estudio de la calidad de las aguas y la aplicación de diferentes ICAS, que a continuación serán abordados.

Samboni Ruiz, Carvajal Escobar y Escobar, 2007 presentan una revisión de los indicadores ICA e ICO más utilizados en algunos países de América y Europa, así como su diseño e interpretación, basados en parámetros físico-químicos para su evaluación. Las variables que consideran en este proceso son: pH, oxígeno disuelto, Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), una forma de nitrógeno, fosfatos y sólidos totales (ST). Su uso no puede ser generalizado ya que se podría terminar en juicios subjetivos, además un solo indicador no evalúa la dinámica de un sistema, por lo que es importante también el estudio de cada variable individualmente.

Lozada, Vélez y Patiño, 2009 realizaron un trabajo bajo el título “Índice de calidad del agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de aguas para consumo humano”. Este método fue utilizado como herramienta para evaluar la variación de la calidad del agua. Los parámetros mayormente empleados en los

ICA presentados son el oxígeno disuelto y el pH, seguido por la DBO₅, los nitratos, los coliformes fecales, la temperatura, la turbidez y los sólidos disueltos totales.

Torres Vega, 2009 presenta la elaboración de un Índice de Calidad de Agua (ICA) para los ríos en Puerto Rico. Este índice clasifica en una escala de 0 a 100 la calidad representativa del agua, según los constituyentes evaluados y esto, a su vez, posibilita la calificación del agua conforme a su estado como bueno, moderado, promedio, alerta o pobre. El ICA desarrollado considera once constituyentes: coliformes fecales, pH, DBO₅, oxígeno disuelto, nitratos, fósforo total, nitrógeno de amonio, sedimentos suspendidos, mercurio, plomo y temperatura, los cuales fueron determinados mediante la evaluación de un grupo de expertos en la calidad de agua.

Llontop, 2010 en la tesis de titulada “Calidad del agua en la cuenca del río Rímac, sector de San Mateo, afectado por las actividades mineras”; aborda los efectos que ha presentado la calidad del agua del río Rímac frente al desarrollo de la actividad minera en el distrito de San Mateo de Huanchor ubicado en la provincia de Huarochirí del departamento de Lima, Perú. Del análisis se obtuvo que el cadmio, plomo, manganeso, arsénico y hierro eran los elementos que tenían que recibir un tratamiento correctivo, ya que sus concentraciones en las aguas del Rímac eran mayores a lo establecido en los estándares de calidad de agua.

Torres y de Navia, 2010 realizaron un trabajo bajo el título “Calidad físico-química y microbiológica del agua del municipio de Bojacá, Cundinamarca”. Este estudio determinó si el agua para consumo humano del área urbana en el municipio de Bojacá Cundinamarca, cumplía con los parámetros físicos, químicos y microbiológicos establecidos en la Resolución 2115 de 2007. Para ello, se realizaron dos muestreos de diferentes puntos de la red de distribución, fuentes naturales y tanques de almacenamiento domiciliario. Se emplearon métodos fotométricos, electrométricos y volumétricos en los respectivos análisis físicos y químicos, para los parámetros microbiológicos se empleó la técnica de filtración por membrana. Los resultados obtenidos evidencian que la mayoría de las muestras no cumplieron con el valor mínimo permisible de cloro residual libre, por

lo tanto, según el índice de riesgo de la calidad del agua para consumo humano (IRCA), son clasificadas como no aptas para consumo humano.

Carrillo Castro y Villalobos Alcázar, 2010 explican que el desarrollo comercial en la zona norte del estado de Veracruz incrementa la contaminación de las aguas, por lo que la afluencia de empresas nacionales y trasnacionales traen consigo mayor desequilibrio a los principales cuerpos de agua y el impacto directo e indirecto es inevitable. Los autores se proponen el objetivo de calcular el índice de calidad de agua y a partir de realizar un análisis estadístico comparativo para conocer el impacto generado por las actividades antropogénicas y las posibles propuestas de solución. El índice de calidad del agua se determinó por el método propuesto por Brown que es una versión modificada del “WQI” que fue desarrollada por la Fundación de Sanidad Nacional de EE.UU.

Castrillón Bedoña y Giraldo, 2012 realizaron un trabajo bajo el título “Determinación de las dosis óptimas del coagulante sulfato de aluminio granulado tipo B en función de la turbidez y el color, para la potabilización del agua en la planta de tratamiento de Villa Santana, Colombia”. Se realizaron ensayos de tratabilidad con el coagulante sulfato de aluminio Granulado TIPO B con el fin de determinar las dosis óptimas requeridas para la remoción de turbidez y color en diferentes muestras de agua recogidas durante un periodo de tiempo específico. Cada muestra recogida presentaba valores significativos en cuanto a turbiedad y color con el fin de obtener un rango amplio para analizar. Las dosis óptimas se determinaron mediante el test de jarras y fueron escogidas a través del decreto 1575 resolución 2115/2007. Los resultados obtenidos después de realizar el test de jarras arrojaron resultados óptimos en cuanto a la remoción de los parámetros fisicoquímicos analizados y el cumplimiento de ellos según la norma.

Aldana Aguilar y Zacarias Laynes, Edison, 2013 proponen un artículo que muestra la variabilidad temporal del recurso hídrico. Determinan los índices de calidad del agua e índices de contaminación del río Cucabaj, así como los costos en los que se incurre para su desinfección por medio de hipoclorito de calcio.

Peñafiel Romero, 2014 realiza un análisis comparativo de la aplicación de los ICA en 7 puntos del río Tomebamba comprendidos en el tramo Llaviuco - Challuabamba monitoreados en un período de 9 meses, de marzo a noviembre del 2013. El análisis mostró que el río disminuye su calidad a medida que avanza su recorrido, presenta una calidad aceptable, poco contaminada y contaminada según ICA. Los parámetros físico - químicos críticos más influyentes en los valores de ICA fueron los nitratos, nitrógeno amoniacal, sólidos disueltos, alcalinidad, dureza y demanda bioquímica de oxígeno durante el estiaje y los fosfatos, sólidos suspendidos y turbiedad en época lluviosa. Se plantea la necesidad del control de la contaminación del río, mediante la construcción de interceptores marginales.

Sucoshañay Villalba et al. 2015 realizaron una investigación en la cuenca del río Puyo localizada en la amazonia ecuatoriana, donde se asienta la capital provincial (Puyo), se determinó que la contaminación afecta a sus principales sistemas fluviales. Se seleccionaron catorce puntos de monitoreo, divididos en la corriente principal y principales tributarios, en los cuales fueron determinados cinco parámetros de calidad de agua: pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, DBO₅ y coliformes fecales, y se aplicó el ICA sp. Los resultados muestran que ocho puntos monitoreados se clasifican medianamente contaminados y dos contaminados, donde uno de ellos es un balneario turístico importante en el territorio y localizado en un tributario principal. Se concluye que en la zona la contaminación existente es efecto de las aguas albañales que se disponen directamente en los ríos y sin tratamiento.

Ortiz-Romero, 2015 en el trabajo “Determinación de metales pesados e índices de calidad en aguas y sedimentos del río Magdalena – tramo Tolima, Colombia” centró su interés en evaluar en época lluviosa y en período seco la concentración de elementos mayores (Na, K, Ca, Mg) y de metales pesados (Cd, Cr, Pb, Hg), en las aguas y sedimentos del río Magdalena, considerado como la más importante arteria fluvial de Colombia. La cuantificación de estas entidades químicas se realizó a través de espectroscopia de absorción atómica. Se encontró que los atributos de calidad y contaminación del agua en todos los puntos muestreados evidenciaron un agua poco recomendable para el consumo humano, al plomo

como el mayor contaminante de éstas, al índice de contaminación por sólidos suspendidos (ICOSUS) como el indicador de contaminación de mayor relevancia.

López, 2016 realiza una investigación titulada “Control de calidad en aguas para consumo humano en la región occidental de Costa Rica” donde se evaluaron diferentes parámetros de calidad del agua para consumo humano, tales como conductividad eléctrica, densidad, pH, dureza total, alcalinidad total, cloruros, magnesio y calcio por absorción atómica, en muestras de agua potable de la región de Occidente del país, incluyen Grecia, Naranjo, San Ramón, Poás, Zarcero, San Carlos y Esparza. El objetivo fue comparar los resultados obtenidos para los parámetros de calidad evaluados entre las muestras analizadas. El estudio arrojó resultados muy favorables, ya que las muestras cumplen con la regulación vigente en el país en cuanto a parámetros de calidad del agua. No obstante, cabe destacar que en los casos de la prueba de alcalinidad total de las muestras de las zonas de San Ramón y San Carlos, los resultados sobrepasan lo recomendado por los parámetros de calidad. Este no es un criterio contemplado en el reglamento vigente en el país, pero se espera que la irregularidad tenga una causa puntual y aleatoria, que no tenga repercusión en la salud humana de la población.

Quiroz Fernández, Izquierdo Kulich y Menéndez Gutiérrez, 2017 realizaron un trabajo titulado “Aplicación del índice de calidad de agua en el río Portoviejo, Ecuador”, evalúa la calidad de agua del río mediante la aplicación del índice de calidad de agua (ICA) bajo la metodología propuesta por la Fundación Nacional de Saneamiento (NSF). En función de los resultados obtenidos mediante la aplicación del ICA determinados en los cuatro puntos evaluados, se evidencia que la calidad de agua del río Portoviejo va disminuyendo a medida que avanza su cauce debido a los vertimientos de aguas residuales que existen a lo largo de su trayectoria. Ello provoca que la corriente vaya disminuyendo en su capacidad de asimilar la carga contaminante y en la restitución de su calidad de forma natural. Excepto los coliformes fecales, ningún otro indicador de los considerados en este trabajo para medir la calidad del agua, supera los límites de tolerancia establecidos por la autoridad ambiental reguladora.

Meza-Leones et al. 2018 presentan un trabajo de gran interés titulado “Evaluación del poder coagulante del sulfato de aluminio y las semillas de Moringa oleífera en el proceso de clarificación del agua de la ciénaga de Malambo-Atlántico”. El objetivo fue evaluar y comparar el poder coagulante que tiene la semilla de Moringa oleífera con la sustancia química más utilizada a nivel mundial en los procesos de clarificación de aguas, sulfato de aluminio. Se realizó un muestreo simple del agua de la ciénaga de Malambo-Atlántico, donde se registraron sus características iniciales. Mediante el test de jarras, se simuló un proceso de clarificación y se observó la reducción de turbidez que se obtuvo con cada coagulante. Se concluyó que el sulfato de aluminio disminuye la turbidez en un 96%, mientras que las semillas de Moringa oleífera reducen este mismo parámetro en un 64%. Por su baja toxicidad, este coagulante natural es una alternativa para reemplazar parcialmente al sulfato de aluminio.

Los índices de calidad de agua desarrollados recientemente en Europa y Estados Unidos para la evaluación del recurso hídrico al ser destinados a consumo humano previo tratamiento, consideran otros parámetros generalmente indicadores de riesgo químico en la fuente. Con relación al riesgo microbiológico, este es evaluado en la generalidad de los ICA, empleándose como parámetros indicadores los coliformes fecales.

En resumen, las estructuras de cálculo que presentan los ICA permiten una evaluación más amplia e integral de la calidad del agua, ya que consideran la variación en el tiempo y en el espacio, y permiten la incorporación de los parámetros que los conforman con la normatividad vigente de acuerdo con el uso evaluado. En este caso se evalúa tanto para consumo humano como para uso industrial.

En Cuba el estudio y aplicación de índices de calidad de las aguas en estos últimos años se ha fomentado, aplicándose tanto para el estudio de aguas subterráneas como superficiales. Se destacan entre ellos:

Fernández Rodríguez, 2003 muestra los resultados de la evaluación de las principales fuentes de agua de consumo en el municipio de Moa. Se evaluaron las principales características físico-químicas para clasificar las aguas según

diferentes autores, para ello se utilizaron las normas nacionales e internacionales para agua potable. Se determinó el grado de contaminación por elementos metálicos y elementos nitrogenados, además de realizarse análisis bacteriológicos.

Laurencio Ricardo, 2005 brinda la posibilidad de conocer la eficacia del proceso de potabilización de las aguas en la Planta Potabilizadora de la Empresa Ernesto Che Guevara (ECG). Se realiza una valoración de los diferentes procesos que tienen lugar durante el tratamiento de las aguas: captación, floculación, sedimentación, filtrado, clarificación y desinfección. Se evaluaron las principales características físico-químicas y se clasificaron las aguas según diferentes autores utilizándose las normas nacionales e internacionales para agua potable. No se evaluaron los costos en el proceso de tratamiento de las aguas.

Fernández-Miguel y Vázquez-Taset, 2006 exponen los principales factores de origen antrópico, geológico y climático que pueden originar contaminación por nitratos (NO_3^-) y nitritos (NO_2^-), influyendo en las condiciones de Cuba. Se analiza la contaminación por estos compuestos nitrogenados en territorios del Sur del Valle del Cauto y la provincia Holguín, así como en territorios de otros países. Se concluye que en las condiciones de Cuba, la contaminación por nitratos y nitritos puede considerarse alarmante, debido al grado de desarrollo actual y a su posible incidencia sobre la salud de la población, esto último evaluado de forma cualitativa. Finalmente se recomiendan varias medidas para detallar las causas principales de la contaminación y como erradicarlas.

Fernández Fis, 2007 realiza un trabajo que evalúa los riesgos por contaminación hídrica y su incidencia en el medioambiente. Se midieron parámetros físicos tales como el pH, la conductividad eléctrica, turbidez y color, elementos químicos mayoritarios: Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , Na^+ , K^+ , y metales (Ni^{2+} , Fe^{2+} , Cr^{6+}). Las muestras estudiadas están caracterizadas por la dureza como aguas blandas hasta aguas muy duras, dulces por mineralización y muy salinizadas a partir de la confluencia con el río Cabaña. Se evaluó la peligrosidad de los diferentes contaminantes y los riesgos a la salud y al medio ambiente, se proponen acciones para la mitigación de la contaminación.

Fernández Rodríguez, Díaz Bisset y Laurencio Ricardo, 2007 muestran una investigación sobre la eficacia del proceso de potabilización de las aguas provenientes del río Moa que se realiza en la Planta Potabilizadora. Se valoran los diferentes procesos que tienen lugar durante el tratamiento de las aguas: captación, floculación, sedimentación, clarificación, filtrado y desinfección. Se realizaron los ensayos a muestras de agua llegadas a la planta con el objetivo de comparar las dosis de reactivos químicos empleadas en la prueba de las Jarras, con las utilizadas en los diferentes procesos, para lograr arribar a conclusiones de las dosis óptimas a emplear. Además, se valoró la calidad de la fuente de suministro, y una evaluación del proceso de desinfección llevado a cabo en dicha planta. Se tuvieron en cuenta la calidad del agua en tratamiento durante cada proceso, así como los análisis microbiológicos, no se evaluaron los costos en el proceso de tratamiento: coagulación, floculación, filtración y cloración de las aguas tratadas.

Fernández Rodríguez, 2007 realiza un trabajo que evalúa la calidad física, química y bacteriológica de las aguas para el consumo humano procedente de pozos criollos cuando falla la distribución de agua potable a través de la red hidrológica de los repartos Las Coloradas y La Playa (municipio de Moa). Los resultados reflejaron la presencia de elementos no deseables, indicadores de contaminación que sobrepasan los índices establecidos para el consumo humano como agua potable. Los resultados del análisis bacteriológico evidenciaron la presencia de bacilos de colis y coliformes fecales, siendo fundamentalmente su composición fecal lo que determina su estado sanitario. Se concluye que las aguas de los pozos criollos estudiados no responden a los requisitos establecidos en las normas para consumo humano.

Puebla Tamayo, 2009 evalúa los contenidos de cloro residual y materia orgánica en aguas de consumo de Moa. Se realizó una caracterización de la calidad del agua filtrada del tanque de almacenamiento para la distribución de la Planta Potabilizadora a los diferentes repartos, así como otras determinaciones de propiedades físicas y organolépticas que sirvieron de base para el estudio del cloro residual y materia orgánica en diferentes puntos representativos de la red de

distribución y domiciliarios. Como resultado se obtuvo alteraciones en los contenidos de Fe y materia orgánica.

Valcárcel Rojas et al. 2010 presentan la metodología para la modelación de tres parámetros que caracterizan la calidad del agua: demanda bioquímica de oxígeno, oxígeno disuelto y amonio en un tramo del río Luyanó. Durante el trabajo se combinaron acertadamente las técnicas de radio trazadores para estimar los parámetros hidrodinámicos de la corriente del río con las técnicas de análisis físico y químico para determinar sus parámetros básicos. Como resultado se obtuvo un modelo que describe en más del 90% el comportamiento de la demanda bioquímica de oxígeno y del oxígeno disuelto y en más del 65% el comportamiento del amonio, por lo que caracteriza adecuadamente los procesos de autodepuración y el balance de oxígeno en las aguas del río.

Betancourt, Suárez y Jorge, 2012 identifican las características físicas y químicas de las aguas y los procesos influyentes en los embalses Paso Bonito, Avilés, Abreus y El Salto, situados en el centro-sur de Cuba, que son usadas en la agricultura, la pesca, la industria y para el consumo humano. La aplicación de los diagramas de Gibbs y Trilineal, sobre los componentes mayoritarios del agua, permitió identificar la meteorización como el proceso natural de mayor influencia sobre la composición química de las aguas. Las concentraciones de los iones mayoritarios solo registraron diferencias significativas entre períodos (seco y lluvioso) en el embalse Abreus, lo cual se relacionó con su posición dentro de la cuenca. La influencia de las actividades antrópicas sobre la calidad del agua se reveló mediante los elementos Cl^- , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} y el índice del estado trófico, determinado mediante mediciones de la transparencia y la concentración de nutrientes y clorofila.

González Cabrera, Peláez García y Sobrino Hernández, 2013 evalúan un sector de estudio ubicado en la cuenca Los Palacios, extendida al sur de La Cordillera de Guaniguanico, a continuación de la Falla Pinar. Como resultado de la evaluación realizada a los pozos perforados tanto de investigación como de explotación, así como de la interpretación de otros datos, se logró ubicar los depósitos de la cubierta. Se evaluaron los recursos de agua subterránea en Categoría B. Además,

con óptica ambiental se evaluó la Intrusión Marina, representándose en un mapa la posición de la línea con 1g/L.

Robert Pullés, 2014 propone el artículo “Microorganismos indicadores de la calidad del agua potable en Cuba” con el objetivo de analizar el enfoque actual existente a nivel nacional e internacional, en relación con los indicadores microbiológicos empleados para la evaluación del agua potable, como elementos clave. Los resultados reflejaron la alternativa de considerar la aplicación de un esquema para monitoreo complementario en Cuba, que incluya algunos agentes biológicos no considerados en la norma, como los virus y los parásitos. Asimismo indicaron la necesidad de establecer un valor de referencia y definir los microorganismos a emplear en los monitoreos de validación, operativo o verificación. Esta propuesta aportaría importante información para la actualización de la norma cubana sobre la base del conocimiento de los estándares internacionales más reconocidos.

Dignorach Suárez Malcolm y Lima Pimienta, 2015 determinaron las características y disponibilidad del agua de lluvia acumulada en las cuencas que se encuentran cercanas al vial que rodea el área donde se construirá el campo de golf en Cayo Coco, así como el agua de los efluentes finales de la planta de tratamiento de residuales Flamenco Oeste y de la futura planta en construcción.

Miravet Sánchez et al. 2016 investigan los índices de calidad de las aguas superficiales y la tolerancia de los macro invertebrados. Estos arrojaron resultados muy similares que caracterizan las aguas desde contaminadas hasta muy contaminadas para todos los puntos de muestreo del río Ariguanabo. Aparecen valores de DQO y coliformes fecales fuera de norma, debido a la gran cantidad de aportes de aguas residuales, con altas concentraciones de materia orgánica de origen doméstico y porcino.

Pérez Osorio et al. 2016 el estudio se realiza en los Cuatro Jagüeyes, donde se determinaron propiedades microbiológicas. Se concluyó que el agua del sector presenta elevada contaminación microbiológica por huevos de helminto, fasciola hepática, coliformes fecales (180 UFC) y totales (475 UFC), lo que representa un

riesgo a la salud de la flora y fauna; así como gran cantidad de sólidos sedimentables y suspendidos.

Rubio Caballero, 2017 realiza estudios físicos químicos y bacteriológicos de las aguas en el poblado de la Melba, aplicando la metodología del índice de calidad de agua de Montoya para evaluar las aguas. Según los estudios estas se clasifican como aguas dulces según su mineralización, por su pH como aguas neutras y ligeramente básicas, por su dureza son aguas blandas y por el índice de calidad del agua según los parámetros utilizados como débilmente contaminadas y contaminadas. Según las normas cubanas establecidas la turbidez, el cadmio, el cromo, el hierro, el mercurio, el níquel, el nitrito, el plomo y el silicio se encuentra fuera de los valores máximos permisibles para ellos.

Crespo Lambert, 2018 evalúa la calidad de las fuentes de abastecimiento de agua en el poblado de Yamanigüey. Determina el estado higiénico - sanitario de las principales fuentes de contaminación en áreas aledañas y las características físicas-químicas y bacteriológicas de las aguas. Las aguas se clasificaron según diferentes autores según las normas nacionales e internacionales para agua potable. Se implementó la metodología de evaluación del índice de calidad de Montoya, 1997 y los datos se expresaron en tablas y gráficos. Se obtuvieron como principales resultados que las aguas según las normas cubanas se clasifican como aguas potables y de acuerdo a los resultados del ICA como aceptables y poco contaminadas.

Por el acelerado grado de contaminación y los cambios en las propiedades del agua, se determinan las características físicas, químicas y microbiológicas de las aguas superficiales del río Moa que son utilizadas para consumo humano e industrial. Es necesario un conocimiento periódico y actualizado sobre la calidad de estas aguas y analizar el grado de influencia que ejerce la alteración de sus propiedades en el proceso de potabilización.

Teniendo en cuenta las experiencias nacionales e internacionales en la aplicación de los ICA, se utiliza para la presente investigación el índice de calidad de Montoya, por considerarse como unos de los más completos e integradores, y por

ser uno de los pocos con connotaciones legales para las aguas de consumo humano e industrial en Centro América.

2.3 Etapa II: Trabajo de campo y de laboratorio.

Esta etapa de la investigación se llevó a cabo a través de varios recorridos para valorar la zona de estudio comprendida desde la Presa Nuevo Mundo hasta La Derivadora Moa. El objetivo fundamental del monitoreo fue identificar los factores naturales y antrópicos que pueden alterar el estado natural de estas aguas.

Se visitaron las Instituciones Gubernamentales del Municipio como Recursos Hidráulicos, la Planta Derivadora Moa, La Estación de Bombeo y la Planta Potabilizadora de la Empresa Ernesto Che Guevara. En la primera institución se obtuvo el registro de precipitaciones de los pluviómetros que se ubican en la Presa Moa, Derivadora Moa y Cayo Grande de Farallones, los cuales forman parte de la zona de estudio. La información obtenida a partir de estos corresponde al período comprendido del 2013-2018.

Se visitó la Planta Derivadora Moa donde se identificó el lugar de la toma de muestra para agua cruda, así como la Estación de Bombeo a través de la cual se capta el agua para el proceso de potabilización.

En la Planta Potabilizadora de la Empresa Ernesto Che Guevara, se obtuvo el registro de análisis físicos-químicos y bacteriológicos del agua cruda (PA2) y el agua tratada (PA7), los promedios mensuales del consumo de reactivos utilizados para el tratamiento de potabilización y los costos incurridos en el proceso, información correspondiente al año 2018. Además, se realizaron recorridos a los distintos procesos que tienen lugar en el tratamiento del agua para conocer su funcionamiento.

2.3.1 Reconocimiento de los principales factores naturales y antrópicos que influyen en la calidad de las aguas del río Moa.

En este punto se hace una descripción general de los principales factores naturales y antrópicos que pueden alterar el estado natural de estas aguas, que influyen de manera considerable en las características de las aguas del río Moa que son captadas para el proceso de tratamiento de agua para consumo humano e industrial. Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Principales factores naturales y antrópicos que influyen en la calidad de las aguas del río Moa.

Factores naturales	Factores antrópicos
Precipitaciones	Minería
Erosión y meteorización	Vías de comunicación
Topografía	Deforestación
Litología	Aguas residuales de la Planta de Preparación de Pulpa.

Factores naturales

Precipitaciones. El aumento de las precipitaciones afecta de manera considerable las aguas del río Moa. En esta zona los terrenos presentan escasa vegetación producto de las labores mineras, por lo que las precipitaciones favorecen que un gran volumen de sedimentos sea transportado al agua, lo que provoca un aumento de la materia sedimentable. Por otra parte, afecta los terrenos del área, formándose por la acción de la escorrentía surcos que ayudan a su vez al transporte del material suelto que llega al río Figura 2.2.



Figura 2.2. A: Volumen de sedimentos acumulados en el río. B: Surcos formados por la acción de la escorrentía.

Erosión y meteorización. La degradación de los suelos de estos sectores se asocia fundamentalmente a procesos geodinámicos exógenos como la meteorización y erosión. Son condicionados fundamentalmente por la litología, el grado de agrietamiento de las rocas, la potencia y humedad de las cortezas

lateríticas, pendientes y concavidad del terreno, la acción de la esorrentía y la falta de cubierta vegetal. Figura 2.3.



Figura 2.3. Erosión y meteorización.

Topografía. La topografía es una variable importante al momento de predecir la erosión y sedimentación en un sitio dado. La longitud de la pendiente influye en la profundidad y por ende en el poder erosivo del flujo superficial que se genere, siendo estas variables mayores en las secciones más bajas de la ladera, debido a una mayor área de contribución (Morgan, 2005). La zona de la cuenca donde está enclavada la minería presenta pendientes elevadas, al no tener vegetación, los trazados inadecuados de caminos verticales que van en dirección perpendicular al cauce del río provocan que el escurrimiento sea más rápido. Figura 2.4.



Figura 2.4. Trazados inadecuados de caminos verticales que van en dirección perpendicular al cauce del río.

Litología. La composición de los suelos de la zona está determinada por la disgregación de las rocas del complejo ofiolítico que presentan altos contenidos de hierro, además de otros metales como magnesio, cromo, cobre, níquel y cobalto, composiciones que también están presentes en este tipo de rocas. Por su parte, el material laterítico se caracteriza por ser muy fino y deleznable, lo que propicia que sea arrastrado con mayor facilidad por las aguas de escorrentías Figura 2.5.



Figura 2.5. Material laterítico característico del área de estudio.

Factores antrópicos

Minería: el agua residual de las actividades mineras se infiltra en los acuíferos interceptados y otra parte por escorrentía superficial va a parar a las aguas de la Presa Nuevo Mundo y el río Moa, lo que propicia la alteración de propiedades físicas como el color, turbidez, sólidos totales y propiedades químicas como el Fe, Ni, Al por dilución de las partículas sólidas Figura 2.6.



Figura 2.6. Desarrollo de la minería en la zona.

Vías de comunicación: otro factor determinante, lo constituye la creación de vías de comunicación o transporte para el movimiento de los equipos utilizados en las

labores mineras, lo que trae como consecuencia la contaminación de las aguas superficiales y suelos por vertidos accidentales de lubricantes y combustibles Figura 2.7.



Figura 2.7. Vía de comunicación para el transporte de los equipos mineros.

Deforestación. La presencia de una cobertura vegetal no sólo protege el suelo contra la erosión, sino que también brinda rugosidad al terreno por el que el flujo superficial viaja, reduciendo su velocidad y, por ende, su poder erosivo. Constituye la defensa natural de un terreno contra la erosión (Morgan, 2005). Como resultado de las actividades mineras se evidencian las áreas desprovistas de vegetación, favoreciendo una mayor degradación de los suelos y por tanto un incremento en el arrastre de sedimentos. Figura 2.8.



Figura 2.8. Área deforestada por el abandono de la actividad minera.

Aguas residuales de la Planta de Preparación de Pulpa. En la planta durante el proceso de purificación o lavado de sus muestras, el agua que queda es reciclada por medio de un sistema de tuberías y pequeños pozos o registros que se

encuentran conectados entre sí, dirigidos directamente a la empresa suministradora. Durante el monitoreo se pudo comprobar que uno de los pozos se encontraba abierto, constituyendo un riesgo considerable puesto que en caso de averías estas aguas residuales contaminarían el río Moa. Figura 2.9.



Figura 2.9. A: Planta de Preparación de Pulpa. B. Sistema de registro abierto.

Influencia del cambio climático en la calidad de las aguas del río Moa.

Al hacer alusión a los factores naturales y antrópicos que afectan la calidad de las aguas del área de estudio, no se puede obviar el cambio climático. Este fenómeno ha estado latente en los últimos años y su influencia guarda relación directa con los factores antes mencionados.

Las consecuencias que genera sobre la calidad de las aguas superficiales y subterráneas cada vez más comienzan a ser una gran preocupación, puesto que afectan en gran medida la conservación y protección de los recursos hídricos.

El río Moa no está exento de estas problemáticas, sino que más bien comparte de cerca la influencia que ejerce el cambio climático en la calidad de sus aguas. El ciclo hidrológico está gobernado por el clima, de tal manera que un cambio en este último provoca variaciones en los distintos elementos del ciclo del agua, así cambios en las precipitaciones determinarán variaciones en las características de la escorrentía y en los eventos extremos de la misma modificando su intensidad y la frecuencia de estos. Con los cambios en la cantidad de agua vienen aparejados los cambios en su calidad. La mayor o menor escorrentía afecta la carga de sedimentos, la composición química, el contenido de carbono orgánico total y la

calidad microbiológica. Estos cambios requieren modificaciones en la capacidad de almacenamiento del agua y en su tratamiento para asegurar agua potable de consumo humano.

Por otra parte, la explotación de yacimientos minerales desarrollados en el área por el método denominado a “cielo abierto”, provoca modificaciones en la cubierta vegetal, lo que conduce a variaciones en la fracción de la radiación solar reflejada en la superficie terrestre. Además, se producen cambios en el balance dentro del ciclo del agua, al modificar los balances de evapotranspiración así como la humedad retenida por la vegetación.

Buscar alternativas para la protección de los recursos hídricos ante el impacto del cambio climático constituye el principal objetivo en nuestro país, por lo que se implementa la Tarea Vida como Plan del Estado para su enfrentamiento. Para ello se ha generado la necesidad de cuantificar y evaluar la calidad de las aguas, para así detectar variaciones y dar la alerta anticipada de cambios en su calidad, tal y como se plantea en las tareas 9 y 10 del citado Plan del Estado.

2.3.2 Tratamiento convencional para la potabilización del agua.

Son tecnologías sencillas, de bajo costo y de fácil implementación que permiten alcanzar niveles aceptables de descontaminación en regiones rurales, de escasos recursos hídricos y económicos.

Procesos tales como almacenamiento, coagulación, floculación, sedimentación y filtración rápida, reducen en grado variable el contenido bacteriológico del agua. Sin embargo, estos procesos no pueden asegurar que el agua que producen sea bacteriológicamente segura. Frecuentemente se necesitará una desinfección final, la cual se encarga de la destrucción o al menos la desactivación completa de los microorganismos dañinos. La cloración es el método más ampliamente utilizado para desinfectar el agua. (Casilla Quispe, 2014).

Captación y conducción

La captación del flujo de agua del río se hace desde la Derivadora Moa. Mediante la Estación de Bombeo que se encuentra situada a 230 m de la cortina de la Presa

Derivadora, el agua captada pasa a través de una tubería de hormigón hasta la cámara de succión de la estación, donde posteriormente es conducida por una tubería hasta la Planta Potabilizadora. Figura 2.10.



Figura 2.10. A. Captación del agua en la Derivadora Moa. B. Estación de Bombeo.

Coagulación

Las partículas que forman la turbiedad y el color de las aguas naturales, poseen cargas eléctricas que normalmente son negativas, pero como también existen cargas eléctricas positivas, se puede afirmar que el agua y las soluciones son eléctricamente neutras. Las cargas eléctricas de las partículas generan fuerzas de repulsión entre ellas, por lo cual se mantienen suspendidas y separadas en el agua. Es por esto que dichas partículas no se sedimentan.

Mediante el proceso de coagulación se neutraliza la carga eléctrica del coloide, lo que favorece la anulación de las fuerzas electrostáticas repulsivas. Esta neutralización suele realizarse al añadir al agua determinadas sales de aluminio o hierro (coagulantes); de forma que los cationes trivalentes de aluminio o hierro neutralizan las cargas eléctricas negativas que suelen rodear a las partículas coloidales dispersas en el agua.

Los productos químicos que se utilizan normalmente en la coagulación son sulfato de aluminio, cloruro férrico, aluminato de sodio y sulfato ferroso. El sulfato de aluminio es el coagulante de uso más extendido. La popularidad de los coagulantes de aluminio y hierro surge no solo de su efectividad como coagulantes, sino también de su disponibilidad y relativo bajo costo. La efectividad

de estos coagulantes surge principalmente por su habilidad de formar complejos polinucleares multicargados en solución con mayores características de adsorción.

Floculación

La formación de los flóculos es consecuencia de la agrupación de las partículas descargadas al ponerse en contacto unas con otras. El coagulante aplicado da lugar a la formación del flóculo, pero es necesario aumentar su volumen, su peso y especialmente su cohesión. Para favorecer el engrosamiento del flóculo será necesaria una agitación homogénea y lenta del conjunto, con el fin de aumentar las posibilidades de que las partículas descargadas eléctricamente se encuentren con una partícula flóculo.

Tan pronto como se agregan coagulantes a una suspensión coloidal, se inician una serie de reacciones hidrolíticas que adhieren iones a la superficie de las partículas presentes en la suspensión, las cuales tienen así oportunidad de unirse por sucesivas colisiones hasta formar flóculos que crecen con el tiempo. La rapidez con que esto ocurre depende del tamaño de las partículas con relación al estado de agitación del líquido, de la concentración de las mismas y de su “grado de desestabilización”, que es el que permite que las colisiones sean efectivas para producir adherencia.

En la planta potabilizadora estos procesos se llevan a cabo en el canal mezclador, donde se adicionan, el sulfato de aluminio y el quimifloc A-130 que constituyen el coagulante y floculante empleados respectivamente. Además se adiciona la cal hidratada, la cual se dosifica con el fin de aumentar el pH del agua. Figura 2.11.



Figura 2.11. Canal mezclador donde se adicionan el sulfato de aluminio (coagulante), el quimifloc A-130 (floculante) y la cal hidratada.

Sedimentación

Se entiende por sedimentación a la remoción por efecto gravitacional de las partículas en suspensión en un fluido y que tengan peso específico mayor que este. En un determinado intervalo de tiempo no todas las partículas en suspensión sedimentan. Justamente las que sedimentan en un intervalo de tiempo elegido son llamadas “sólidos sedimentables”. Figura 2.12.

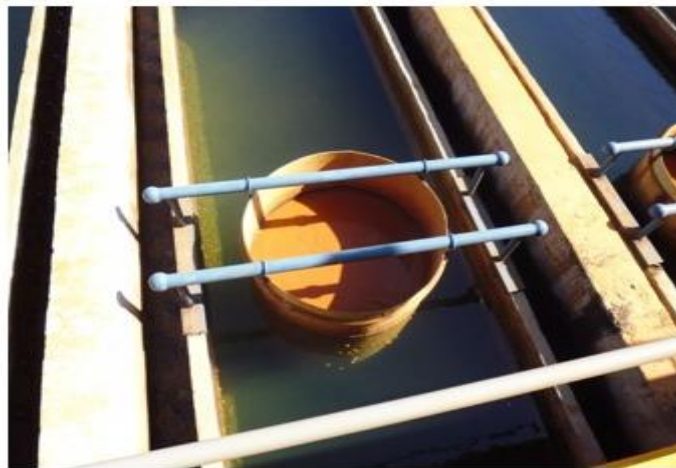


Figura 2.12. Proceso de sedimentación.

La sedimentación como tal, es en esencia un fenómeno netamente físico. Está relacionada exclusivamente con las propiedades de caída de las partículas en el agua. Cuando se produce sedimentación de una suspensión de partículas, el

resultado final será siempre un fluido clarificado y una suspensión más concentrada (Castrillón Bedoña y Giraldo, 2012).

Filtración

Es la remoción de sólidos suspendidos y coloidales presentes en una suspensión acuosa a través de un medio poroso. El agua decantada o clarificada llega hasta los filtros, el trabajo de éstos depende directamente de la eficiencia del proceso de sedimentación. La tubería que conduce el agua hasta los filtros está colocada en forma de campana invertida, para formar la menor turbulencia posible durante la caída del agua en estos. Figura 2.13.

En general, la filtración es la operación final, que se realiza en una planta de tratamiento de agua y por consiguiente, es la responsable principal de la producción de agua de calidad coincidente con los patrones de potabilidad.



Figura 2.13. Proceso de filtración.

Desinfección

Es un proceso selectivo para la destrucción de microorganismos patógenos presentes en el agua (bacterias, protozoarios, virus y parásitos). El agente de desinfección más empleado es el cloro, oxidante poderoso, es, sin duda alguna, el desinfectante más importante que existe, debido a que reúne todas las ventajas requeridas, incluye su fácil dosificación y costo conveniente. Por otro lado, las aguas suministradas por una planta de tratamiento de agua para consumo humano pueden sufrir recontaminación en los tanques de almacenamiento o en

las redes de distribución antes de ser distribuidas a la población. La desinfección debe protegerlas también de estas situaciones de riesgo posteriores al tratamiento (Idrovo, 2010).

Para la desinfección y el tratamiento de aguas, se emplea el cloro gaseoso generado a partir de la vaporización de cloro líquido almacenado bajo presión en balones de 1t. La desinfección se realiza en tanques de contacto de forma rectangular con tabiques de ida y regreso que retienen el agua durante todo el tiempo de contacto. Para la aplicación del cloro gaseoso, se usan cloradores del tipo de solución al vacío donde se succiona gas por medio de vacío generado en un inyector. La operación de esta unidad es por control manual. El producto final luego es conducido a los 2 tanques de almacenamiento de agua potable que tienen una capacidad de 5500m³. Figura 2.14.



Figura 2.14. A. Balones de cloro líquido almacenado bajo presión. B. Tanques de almacenamiento de agua potable de 5500m³.

El resultado final en la planta, lo constituye el agua tratada la cual cumple con las normas nacionales e internacionales establecidas para su calidad. Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Parámetros físico-químicos y bacteriológicos del agua tratada.

Meses	Color (Pt/Co)	Turb. (NTU)	pH	Fe ²⁺ (mg/L)	C.E (μs/cm)	STD (mg/L)	Temp. (°C)	C. Term. (NMP/100)	Ni ²⁺ (mg/L)
Enero	4.71	2.62	7.62	0.28	167.23	77.21	22.68	0	0.016
Febrero	1.80	0.38	7.82	0.18	143.21	62.11	23.39	0	0.012
Marzo	2.26	1.30	7.61	0.23	158.12	70.24	22.84	0	0.013
Abril	1.85	0.42	7.48	0.07	135.55	60.33	23.08	0	0.011
Mayo	4.66	2.50	7.43	0.25	169.41	79.78	24.11	0	0.014
Junio	1.74	0.10	7.73	0.05	151.96	66.13	25.25	0	0.008
Julio	1.78	0.30	7.73	0.03	139.52	59.98	26.76	0	0.0012
Agosto	1.79	0.35	7.69	0.17	140.87	60.25	26.53	0	0.009
Septiembre	2.88	1.70	7.83	0.19	150.24	69.13	26.56	0	0.0014
Octubre	3.27	2.20	7.83	0.22	146.45	63.11	26.37	0	0.017
Noviembre	4.12	2.32	7.63	0.21	168.24	77.01	24.37	0	0.015
Diciembre	4.56	2.46	7.80	0.24	179.55	79.35	27.79	0	0.016

Una vez que es almacenada, se suministra a toda la zona industrial del municipio principalmente la empresa Ernesto Che Guevara. Este procedimiento se lleva a cabo a través de la conductora maestra formada por dos tuberías aéreas de 800 mm de diámetro que conduce el agua por gravedad, parte de esta es suministrada a la población de los repartos Coloradas, Caribe, Moa centro, Atlántico, Miraflores, Joselillo y Haití Chiquito en el territorio de Moa.

2.3.3 Análisis en el laboratorio

El procesamiento y determinación de las propiedades físicas-químicas y bacteriológicas del agua (PA2) se realizaron en el laboratorio de la Unidad Básica de Servicio Planta Recepción y Suministro (UBSPRS) perteneciente a la Planta potabilizadora de Agua.

Propiedades físicas y químicas determinadas: pH, alcalinidad total (Alcm), temperatura (T⁰C), sólidos totales disueltos (STD), dureza total, color, turbidez, conductividad eléctrica, calcio (Ca²⁺), magnesio(Mg²⁺), cloruro, sulfato (SO₄²⁻), nitrito (NO₂⁻), nitrato (NO₃⁻), materia orgánica, demanda bioquímica de

oxígeno(DQO), (DBO_5), hidrocarbonatos (HCO_3^-), carbonatos(CO_3^{2-}), sodio (Na^+), potasio (K^+), manganeso (Mn^{2+}), aluminio (Al^{3+}), níquel(Ni^{2+}), hierro(Fe^{2+}) y cloruro (Cl^-).

Para la realización de este conjunto de análisis se emplearon equipos instrumentales con una alta precisión en los resultados, los cuales se mencionan a continuación:

- Para las determinaciones conductividad y sólidos totales disueltos se empleó el conductímetro WTWLF – 330 UNICAM.
- Determinaciones de pH, el potenciómetro WTW UNICAM.
- Por el método de Análisis Colorimétrico fueron determinados el color y la turbidez, NO_2^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , Fe^{2+} , y Al^{3+} , con el empleo del espectrofotómetro DR–2000 y el espectrofotómetro ultravioleta visible Helios λ UNICAM.
- Para las determinaciones del Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , CO_3^{2-} , HCO_3^- y para los restantes elementos se empleó el método de valoración volumétrica.
- El método de Espectrofotometría de Absorción Atómica se empleó para los elementos: Ni^{2+} , Mn^{2+} , Na^+ y K^+ .

Los resultados se expresan en miligramos por litros (mg/L), pH en unidades de pH, conductividad en micro siemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$), color en Unidades de Color Platino Cobalto (Pt/Co), la turbidez en Unidades Nefelométricas (NTU).

Propiedades bacteriológicas: en este laboratorio se establecieron los contenidos de coliformes totales y termotolerantes, expresados en Unidades Formadoras de Colonias (UFC), una medida de la población bacteriana (NMP/100 mL).

El total de las muestras analizadas es 1460, dado que en la planta laboran 2 turnos de trabajo (A y B), que laboran diariamente. Por cada turno se realizan 2 muestreos, lo que equivale a un total de 4 muestreos diarios. De forma general se determinaron el total de las muestras multiplicando los 365 días del año 2018 por los 4 muestreos diarios.

2.4 Etapa III Trabajo de Gabinete.

Procesamiento y análisis de la información

A partir de los resultados obtenidos en el laboratorio, se formuló una base de datos, la cual se procesó mediante metodologías existentes, permitiendo la clasificación de las aguas según diferentes autores. A través de Google Map y el software ArGis fue posible la confección del mapa de ubicación geográfica.

Se empleó Microsoft Power Point en la realización de la ponencia de este trabajo y Microsoft Word para la confección del informe. Microsoft Excel se utilizó en la realización de las tablas que definen las características específicas de cada uno de los meses objeto de estudio y en especial en la creación de hojas de Excel con las fórmulas de ICA en formato digital, para facilitar el trabajo para investigaciones posteriores.

La interpretación de los análisis físico - químicos se expresaron mediante el manejo de gráficas, diagramas y tablas, para simplificar los datos, principalmente cuando se realizan comparaciones entre los meses analizados.

Para la determinación de la calidad de estas aguas se empleó la metodología del Índice de Calidad de Agua de Montoya *et al.*, 1997. Se emplearon las clasificaciones de varios autores atendiendo a la composición química de las aguas y propiedades físicas de las mismas, recogidas en (De Miguel Fernández, 2012).

2.5 Metodología para la evaluación de la calidad de las aguas por su composición química

Clasificación de las aguas por su composición química.

Para esta clasificación se utilizó la clasificación de Aliokin, la cual está basada en el principio de división por los iones predominantes y relación entre ellos. Se basa en el contenido en las aguas de sus iones principales representados en miligramos equivalentes (mg-eq/L).

Todas las aguas se dividen por el anión predominante en tres grandes clases: bicarbonatadas y carbonatadas ($\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$), sulfatadas (SO_4^{2-}) y cloruradas

(Cl⁻). Cada grupo a su vez se divide en tres tipos por la relación entre los miligramos equivalentes (mg· eq/L) de los iones.

Clasificación de las aguas según su mineralización

Para determinar la clasificación de las aguas según su mineralización se basa en la clasificación de Aliokin, se utiliza la fórmula que relaciona mediante una fracción la sumatoria de los aniones y los cationes.

$$M = \frac{\sum A + C}{1000} (g / L)$$

Tabla 2.3 Clasificación de las aguas por su mineralización según Aliokin.

Mineralización g/L	Denominación de las
< 1	Aguas dulces
1 – 3	Aguas poco salinizadas
3 – 10	Aguas saladas
10 – 50	Muy saladas
> 50	Rasoles

Fuente: Tomado (De Miguel Fernández, 2012)

Clasificación de las aguas por el pH

La concentración de iones de hidrógeno (pH) en el agua se acostumbra a expresarla en forma logarítmica con signo negativo, el cual es representado por el símbolo pH, que nos determina el grado de acidez del agua, $pH = -\log (H^-)$. Para la determinación de las aguas por su pH se emplea la clasificación de E. B. Pasovox.

Tabla 2.4. Clasificación de las aguas por su pH según E. B. Pasovox.

Valor del pH	Denominación de las aguas
< 3	Muy ácida
3 – 5	Ácidas
5 - 6.5	Débilmente ácida
6,5 - 7,5	Neutras
7,5 - 8,5	Débilmente básicas
8,5 - 9,5	Básicas
> 9,5	Muy básicas

Tomado (De Miguel Fernández, 2012)

Clasificación de las aguas por su dureza.

Está representada por el contenido total de sales de calcio y magnesio presentes en las aguas subterráneas, expresadas en miligramos equivalentes (mg-equiv/L). A través de la fórmula: $(Ca^{2+} + Mg^{2+})$.

Tabla 2.5. Clasificación de las aguas por la dureza total según O. A. Aliokin.

Dureza – mg-equiv/l	Denominación de las aguas
< 1,5	Muy blandas
1,5 – 3,0	Blandas
3,0 – 6,0	Algo duras
6,0 – 9,0	Duras
> 9,0	Muy duras

Tomado (De Miguel Fernández, 2012)

2.5.1 Índice de Calidad de Agua según Montoya et al., 1997.

La implementación de nuevas metodologías que involucren más de dos parámetros para la valoración de la calidad del agua toma cada vez más importancia, los Índices de calidad del agua engloban varios parámetros en su mayoría fisicoquímicos y en algunos casos microbiológicos que permiten reducir la información a una expresión sencilla, conocida como: Índices de calidad del agua (ICA) (Samboni Ruiz, Carvajal Escobar y Escobar 2007).

Como se ha expresado anteriormente en este trabajo, se decidió utilizar el ICA de Montoya por considerarse como uno de los más completos e integradores, y por ser uno de los pocos con connotaciones legales para las aguas de consumo en Centro América, además permite evaluar las aguas para consumo humano e industrial.

2.5.2 Metodología del Índice de Calidad de Agua según Montoya et al., 1997.

El grado de contaminación del agua es medido en términos del índice, definido como el grado de contaminación existente en el agua de la muestra, expresado como un porcentaje de agua pura. Así, para el agua totalmente contaminada tendrá un índice de calidad cercano o igual a 0 y para aguas de excelentes condiciones de 100. Por lo tanto, el índice es un porcentaje promedio del efecto

que causan los diferentes niveles de cada uno de los variables medidos en un cuerpo de agua. Este índice de calidad del agua es el único que tiene connotaciones legales, ya que se emplea para establecer normas de descargas.

Cantidad de materia orgánica: determinadas por el porcentaje de saturación del oxígeno disuelto (OD) y la demanda biológica de oxígeno (DBO₅).

Materia bacteriológica presente: determinada por Coliformes totales (CT) y Coliformes fecales (CF) o termotolerantes.

Características físicas: determinadas por el color y la turbidez (T).

La materia orgánica: es determinada por alcalinidad (ALC), dureza (Dt), Cloruros (Cl⁻), conductividad específica (Cond.), concentración de iones Hidrogeno (pH), grasas y aceites (G y A), sólidos suspendidos (SS), sólidos disueltos (STD), nutrientes: nitratos (NO₃⁻), nitrógeno amoniacal (NH₃⁺), fosfatos (PO₄⁼) y detergentes (SAAM).

Debido a que ciertas pruebas son más representativas de la calidad de agua que otras, se asignan ciertos pesos específicos a los 18 diferentes variables designados, representados por W_i , estos pesos específicos están de acuerdo con la naturaleza del cuerpo de agua en estudio, de tal manera que la fórmula que proporciona el índice de calidad de agua es:

$$ICA = \sum_{i=1}^n (I_i * W_i) / \sum_{i=1}^n W_i$$

Donde: **ICA** = índice de Calidad del Agua, $0 < I < 100$, **I_i** = Función subíndice del parámetro i, $0 < I < 100$, **W_i** = Peso de importancia del parámetro (Factor de Ponderación) i, $0 < W_i < 5$, **n** = Número de variables empleados.

Las ecuaciones funcionales subíndices (Tabla 2.6) para cada uno de las variables empleados en el cálculo del índice, se muestran a continuación.

Tabla 2.6. Funciones de los subíndices del ICA de Montoya *et al.*, 1997.

Parámetro	Ecuación	Ponderación
DBO ₅	$I=120(\text{DBO}_5)^{0.673}$	0.2
Coliformes totales	$I=97.5(\text{CT})^{0.270}$	0.5
Coliformes fecales	$I=97.5(5*\text{CF})^{0.270}$	0.5
Conductividad	$I=540(\text{Conduct})^{-0.379}$	4.0
Cloruros	$I=(\text{Cl}^-)^{0.223}$	1.0
Dureza total	$I=10^{1.974-(0.00174*DT)}$	0.1
pH	$I=10^{[4.22-0.293(\text{pH})]}$	4.0
Sólidos totales disueltos	$I=109.1-0.0175(\text{STD})$	2.0
Color Pt-co	$I=123(\text{Color})^{-0.295}$	4.0
Turbiedad	$I=108(\text{Turb})^{-0.178}$	4.0

Tomado y modificado de (Fernández Parada & Solano Ortega, 2013).

Después de calcular los valores del ICA de Montoya y en dependencia de los mismos, se puede definir si las aguas se clasifican como: no contaminada, aceptable para el consumo, poco contaminada, contaminada o altamente contaminada. Tabla 2.7

Tabla 2.7. Criterio general de las aguas según el valor del Índice de Calidad del Agua de Montoya *et al.*, 1997.

ICA	Criterio general
85-100	No contaminado
70-84	Aceptable
50-69	Poco contaminado
30-49	Contaminado
0-29	Altamente contaminado

Fuente: Tomado de Fernández Rodríguez *et al.*, 2019.

De igual forma teniendo en cuenta los valores del ICA se establece su clasificación en función del uso, para abastecimiento público y consumo industrial.

Tabla 2.8. Escala de clasificación del Índice de Calidad del Agua en función del uso.

ICA	Criterio general	Abastecimiento público	Industrial
100	No contaminado	No requiere purificación	No requiere purificación
95			
90			
85			
80	Aceptable	Ligera purificación	Ligera purificación para algunos procesos
75			
70			
65			
60	Poco contaminado	Mayor necesidad de tratamiento	Sin tratamiento para la industria normal
55			
50			
45	Contaminado	Dudoso	Tratamiento en la mayor parte de la industria
40			
35			
30			
25	Altamente contaminado	No aceptable	Uso restringido
20			
15			
10			No aceptable
5			
0			

Fuente: Tomado de Fernández Rodríguez *et al.*, 2019.

CAPÍTULO III: ÍNDICE DE CALIDAD DE AGUA DEL RÍO MOA Y SU INFLUENCIA EN LOS COSTOS DE TRATAMIENTO DE POTABILIZACIÓN.

3.1 Aspectos generales.

El agua potable se considera uno de los principales objetivos dentro de la salud pública, en cuanto a su suministro, acceso y uso, con el fin de garantizar su calidad para satisfacer las necesidades de la población. El proceso de potabilización tiene como fin brindar un agua que cumpla con cada requisito establecido, pasando esta por diversos procesos de potabilización, cada uno con un resultado específico, los cuales se seleccionan teniendo en cuenta la procedencia del agua que será tratada.

Existen diferentes problemáticas en cuanto al nivel de efectividad de cada uno de los procesos que forman parte del tratamiento convencional, debido a que las condiciones del agua a tratar no siempre son las mismas, por lo que afecta el resultado de cada etapa.

Teniendo en cuenta lo antes expuesto, esta investigación está encaminada a determinar los factores naturales y antrópicos que pueden alterar la calidad de las aguas del río Moa. También se propone realizar un análisis de las principales características físico-químicas y bacteriológicas de las aguas crudas que entran a la planta, aspectos esenciales que contribuyen a determinar el Índice de calidad y el grado de influencia en los costos para el tratamiento de potabilización.

Por eso la evaluación de la calidad del agua cruda debe considerar indicadores representativos que garanticen un análisis integral del recurso hídrico, siendo una de las herramientas más empleadas los índices de calidad del agua (ICA). La finalidad de establecer la metodología del cálculo del índice de calidad de agua de los recursos hídricos superficiales, es expresar la condición o estado de la calidad del agua a partir de rangos establecidos, a través de un método simple, conciso y válido, sobre la base de los resultados generados en el análisis de las muestras de agua, en un curso de agua, río.

3.2 Evaluación y clasificación de las aguas del río Moa por su composición química y propiedades físicas.

Seguidamente se evalúan las aguas del río Moa, atendiendo a las clasificaciones propuestas por varios autores recogidas en (De Miguel Fernández, 2012), NC: 827: 2017, NC: 1021: 2014 y la norma de la (OMS, 2006) y basados en la composición química, propiedades físicas y bacteriológicas de las mismas.

En las tablas 3.1 y 3.2, se muestran los resultados obtenidos en los laboratorios en cuanto a la composición química, propiedades físicas y bacteriológicas de las muestras analizadas en los diferentes meses.

Tabla 3.1. Resultados de los análisis físicos- químicos de las aguas en los diferentes meses.

Meses	pH	STD mg/L	C.E µs/cm	Color Pt/Co	Turb. NTU	Temp. (°C)	M.O mg/L	D.total mg/L	DQO mg/L	DBO ₅ mg/L	HCO ₃ ⁻ mg/L	SO ₄ ²⁻ mg/L	Alcm mg/L
Enero	8.42	81.89	176.17	268.00	63.00	23.00	2.60	73.50	45.20	1.91	95.00	12.80	62.83
Febrero	8.00	66.17	148.10	70.40	20.51	23.65	1.84	75.61	28.30	0.30	60.00	7.56	65.79
Marzo	8.29	73.80	162.10	204.00	44.56	24.02	2.04	73.50	31.56	0.92	88.00	10.24	58.68
Abril	8.02	69.95	148.20	46.53	9.17	24.60	1.57	61.60	26.06	0.38	63.00	7.08	55.62
Mayo	8.34	82.03	177.10	270.00	65.30	25.40	2.31	89.14	40.21	1.31	101.00	9.98	71.50
Junio	8.09	67.73	160.50	65.00	15.33	26.60	1.72	94.98	33.57	0.25	70.00	7.21	73.03
Julio	8.13	68.27	145.80	42.00	7.02	25.50	1.44	88.29	31.05	0.33	55.00	6.56	72.05
Agosto	8.17	69.24	146.00	43.00	7.99	26.48	1.56	83.41	34.21	0.41	58.00	7.13	72.78
Septiembre	8.26	71.78	153.20	78.00	25.37	26.67	1.82	70.96	36.04	0.98	63.00	7.71	65.00
Octubre	8.28	72.57	156.00	256.00	55.57	25.73	2.18	70.48	37.88	1.20	75.00	7.33	65.94
Noviembre	8.30	77.24	176.10	126.00	36.21	25.10	1.99	67.19	37.02	1.12	89.00	13.46	58.84
Diciembre	8.40	85.00	184.50	142.00	38.41	24.14	2.11	69.40	38.00	1.50	100.00	17.49	57.49

Tabla 3.2. Resultados de los análisis físico- químicos de las aguas en los diferentes meses.

Meses	CO ₃ ⁻ mg/L	NO ₂ ⁻ mg/L	NO ₃ ⁻ mg/L	Ca ²⁺ mg/L	Mg ²⁺ mg/L	Na ⁺ mg/L	K ⁺ mg/L	Mn ²⁺ mg/L	Al ³⁺ mg/L	Ni ²⁺ mg/L	Fe ²⁺ mg/L	Cl ⁻ mg/L
Enero	11.00	0.05	1.95	5.72	17.88	6.03	1.06	0.012	0.07	0.09	2.8	17.74
Febrero	8.00	0.01	1.50	3.82	16.10	5.23	0.89	0.002	0.02	0.02	0.9	17.19
Marzo	12.00	0.04	1.85	3.90	16.59	6.55	0.74	0.005	0.05	0.07	2.21	15.98
Abril	6.00	0.03	1.60	3.99	17.66	5.03	0.55	0.003	0.03	0.03	0.51	15.48
Mayo	14.00	0.06	1.51	5.57	18.88	6.42	0.84	0.009	0.08	0.09	2.76	15.37
Junio	9.00	0.02	1.73	3.59	17.01	5.21	0.65	0.002	0.05	0.01	0.95	16.03
Julio	7.00	0.01	1.76	3.52	16.66	4.89	0.45	0.001	0.03	0.02	0.71	15.91
Agosto	6.00	0.02	1.81	3.41	16.06	5.55	0.82	0.001	0.04	0.01	0.54	15.65
Septiembre	8.00	0.02	1.74	4.20	18.06	4.84	0.45	0.003	0.06	0.04	0.86	19.68
Octubre	15.00	0.03	1.65	4.93	17.99	5.13	0.89	0.004	0.05	0.07	0.91	14.81
Noviembre	13.00	0.05	1.48	4.39	17.65	5.85	0.92	0.006	0.06	0.04	1.47	14.90
Diciembre	18.00	0.03	1.68	4.85	18.02	6.82	1.02	0.007	0.08	0.07	1.61	14.59

3.2.1 Clasificación de las aguas por su mineralización según Aliokin

La mineralización de las aguas es un factor que en muchos casos resulta determinante en la utilización para distintos fines. En las aguas naturales se han encontrado más de 60 elementos, los cuales están presentes en forma de iones, moléculas no disociadas y coloidales. Sin embargo, generalmente en las aguas solo se encuentra una parte de estos elementos, de ellos solo algunos se encuentran en cantidades considerables, que son los que determinan la mineralización de las aguas, entre estos últimos los más frecuentes son: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- . La mineralización del agua caracteriza el contenido total de materia, expresando la concentración de la misma en mg / L (De Miguel Fernández, 2012).

De acuerdo a los valores calculados (Tabla 3.3) de la mineralización y la clasificación de las aguas establecida por Aliokin, las aguas por meses presentan valores de mineralización menores que 1 g/L, por lo que se clasifican como aguas dulces.

Las mayores mineralizaciones corresponden a los meses de enero, mayo, noviembre y diciembre, en correspondencia con la alta pluviometría reportada en estos meses. Figura 3.1.

Tabla 3.3. Valores empleados en la determinación de la mineralización en g/L.

Meses	Aniones						Cationes								Mineralización		
	HCO ₃ ⁻ mg/L	SO ₄ ²⁻ mg/L	Cl ⁻ mg/L	CO ₃ ⁻ mg/L	NO ₂ ⁻ mg/L	NO ₃ ⁻ mg/L	Ca ²⁺ mg/L	Mg ²⁺ mg/L	Na ²⁺ mg/L	K ²⁺ mg/L	Mn ²⁺ mg/L	Al ³⁺ mg/L	Ni ²⁺ mg/L	Fe ²⁺ mg/L	A + C / 1000 g/L		Clasificación
Enero	95.00	12.80	17.74	11.00	0.05	1.95	5.72	17.88	6.03	1.06	0.012	0.07	0.09	2.8	0.17	<1	aguas dulces
Febrero	60.00	7.56	17.19	8.00	0.01	1.50	3.82	16.10	5.23	0.89	0.002	0.02	0.02	0.9	0.12	<1	aguas dulces
Marzo	88.00	10.24	15.98	12.00	0.04	1.85	3.90	16.59	6.55	0.74	0.005	0.05	0.07	2.21	0.15	<1	aguas dulces
Abril	63.00	7.08	15.48	6.00	0.03	1.60	3.99	17.66	5.03	0.55	0.003	0.03	0.03	0.51	0.12	<1	aguas dulces
Mayo	101.00	9.98	15.37	14.00	0.06	1.51	5.57	18.88	6.42	0.84	0.009	0.08	0.09	2.76	0.17	<1	aguas dulces
Junio	70.00	7.21	16.03	9.00	0.02	1.73	3.59	17.01	5.21	0.65	0.002	0.05	0.01	0.95	0.13	<1	aguas dulces
Julio	55.00	6.56	15.91	7.00	0.01	1.76	3.52	16.66	4.89	0.45	0.001	0.03	0.02	0.71	0.12	<1	aguas dulces
Agosto	58.00	7.13	15.65	6.00	0.02	1.81	3.41	16.06	5.55	0.82	0.001	0.04	0.01	0.54	0.15	<1	aguas dulces
Septiembre	63.00	7.71	19.68	8.00	0.02	1.74	4.20	18.06	4.84	0.45	0.003	0.06	0.04	0.86	0.13	<1	aguas dulces
Octubre	75.00	7.33	14.81	15.00	0.03	1.65	4.93	17.99	5.13	0.89	0.004	0.05	0.07	0.91	0.14	<1	aguas dulces
Noviembre	89.00	13.46	14.90	13.00	0.05	1.48	4.39	17.65	5.85	0.92	0.006	0.06	0.04	1.47	0.16	<1	aguas dulces
Diciembre	100.00	17.49	14.59	18.00	0.03	1.68	4.85	18.02	6.82	1.02	0.007	0.08	0.07	1.61	0.18	<1	aguas dulces

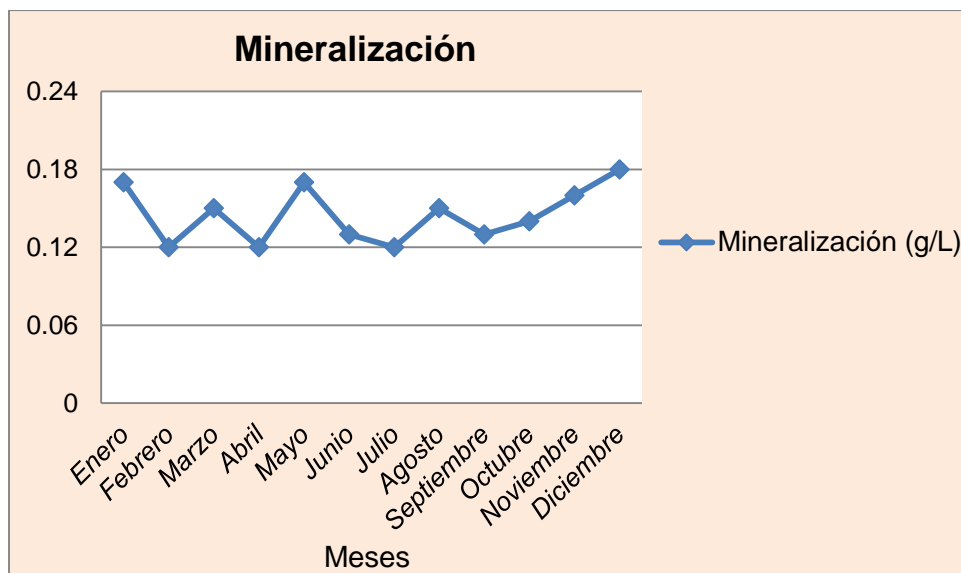


Figura 3.1 Comportamiento de la mineralización en las aguas de captación pertenecientes al río Moa.

3.2.2 Clasificación de las aguas por su composición química según Aliokin

De acuerdo a la composición química (ver tabla 3.4.) de las muestras estudiadas en los diferentes meses y la relación entre los miligramos equivalentes por litro (mg·eq/L) de los iones de HCO_3^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} y Mg^{2+} ; se determinó que el tipo de agua de 4 de los 12 meses analizados (enero, mayo, noviembre y diciembre) son del tipo II, de mediana mineralización (MM) ya que se caracterizan por la relación $\text{HCO}_3^- < (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) < (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ y tipo III fuertemente mineralizadas (FM) las 8 muestras restantes (febrero, abril, junio, julio, agosto, septiembre y octubre), caracterizándose por la relación $(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}) < (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$. Debido a la concentración de los iones HCO_3^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- las aguas analizadas, según Aliokin se clasifican en hidrocarbonatadas-magnésicas.

Tabla 3.4. Contenidos expresados en mg·eq/L utilizados para la determinación del tipo de agua y su clasificación por su mineralización según Aliokin.

Meses	Ca ²⁺ mg·eq /L	Mg ²⁺ mg·eq /L	SO ₄ ²⁻ mg·eq /L	HCO ₃ ⁻ mg·eq /L	Ca ²⁺ + Mg ²⁺ mg·eq /L	HCO ₃ ⁻ + SO ₄ ²⁻ mg·eq /L	Tipo	Clasificación
Enero	0.29	17.88	0.27	1.56	1.76	1.82	II	MM
Febrero	0.19	16.93	0.16	0.98	1.51	1.14	III	FM
Marzo	0.19	15.39	0.21	1.44	1.56	1.66	II	MM
Abril	0.20	16.08	0.15	1.03	1.65	1.18	III	FM
Mayo	0.28	16.96	0.21	1.66	1.83	1.86	II	MM
Junio	0.18	15.26	0.15	1.15	1.58	1.30	III	FM
Julio	0.18	16.06	0.14	0.90	1.55	1.04	III	FM
Agosto	0.17	15.69	0.15	0.95	1.49	1.10	III	FM
Septiembre	0.21	14.60	0.16	1.03	1.69	1.19	III	FM
Octubre	0.25	14.53	0.15	1.23	1.72	1.38	III	FM
Noviembre	0.22	14.13	0.28	1.46	1.67	1.74	II	MM
Diciembre	0.24	15.88	0.36	1.64	1.72	2.00	II	MM

3.2.3 Clasificación de las aguas por el pH según E.B Pasoxov.

El pH es la concentración relativa de los iones hidrógeno en el agua, es la que indica si ésta actuará como un ácido débil, o si se comportará como una solución alcalina. Es una medición valiosa para interpretar los rangos de solubilidad de los componentes químicos. Mide la acidez o la alcalinidad del agua. La actividad del ión hidrógeno puede afectar directa o indirectamente la actividad de otros constituyentes presentes en el agua. La medida del pH constituye un parámetro de importancia para la descripción de los sistemas biológicos y químicos de las aguas naturales (Casilla Quispe, 2014).

Según los resultados obtenidos en el laboratorio los valores de pH varían de 8.0 a 8.42, mínimo y un máximo respectivamente (Figura 3.2). De forma general las aguas se clasifican como débilmente básicas con valores entre 7.5 y 8.5.

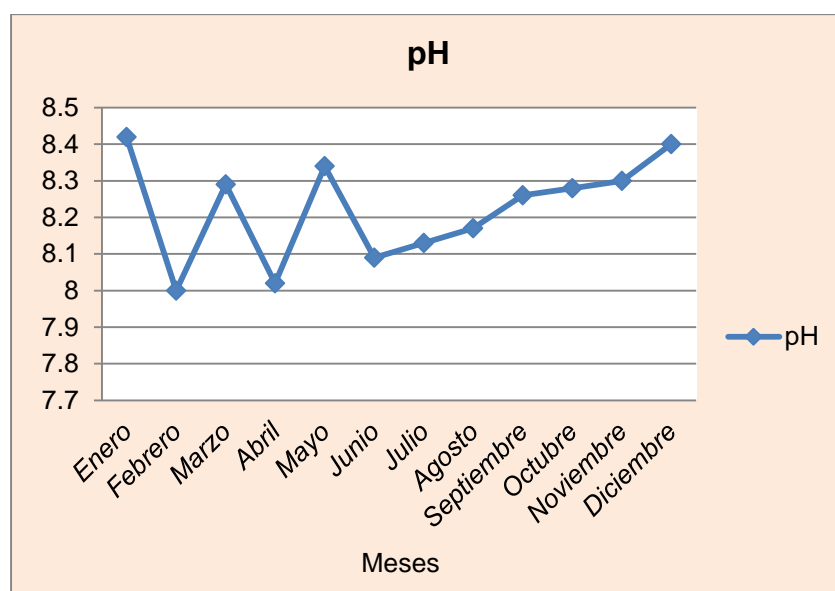


Figura 3.2 Comportamiento del pH en las aguas de captación pertenecientes al río Moa.

De acuerdo a la NC 827: 2017, estos valores registrados en cada uno de los meses, se encuentran dentro de los límites máximos admisibles (valores de pH entre 6.5 y 8.5), lo que significa que las mismas cumplen con la norma y pueden ser declaradas como agua potable según los valores de pH que presentan.

3.2.4. Clasificación de las aguas por su dureza total según Aliokin.

La dureza está representada por el contenido total en miligramos equivalentes (mg.eq/L) de sales de calcio y magnesio, según la clasificación de las aguas por la dureza total establecida por Aliokin. En los meses analizados las aguas se clasifican como blandas por presentar valores entre 1.5 y 3.0 mg.eq/L, como se puede observar en la Tabla 3.5. y en la Figura 3.3.

La dureza baja es ocasionada fundamentalmente por los bajos contenidos de calcio, debido particularmente al medio geológico que el río atraviesa, fundamentalmente rocas ultrabásicas serpentinizadas.

Tabla 3.5. Valores de la dureza total (mg.eq/L) con su clasificación correspondiente en los meses analizados.

Código	Dureza total mg.eq/L	Clasificación
Enero	1.76	Aguas blandas
Febrero	1.51	Aguas blandas
Marzo	1.56	Aguas blandas
Abril	1.65	Aguas blandas
Mayo	1.83	Aguas blandas
Junio	1.58	Aguas blandas
Julio	1.55	Aguas blandas
Agosto	1.49	Aguas blandas
Septiembre	1.69	Aguas blandas
Octubre	1.72	Aguas blandas
Noviembre	1.67	Aguas blandas
Diciembre	1.72	Aguas blandas

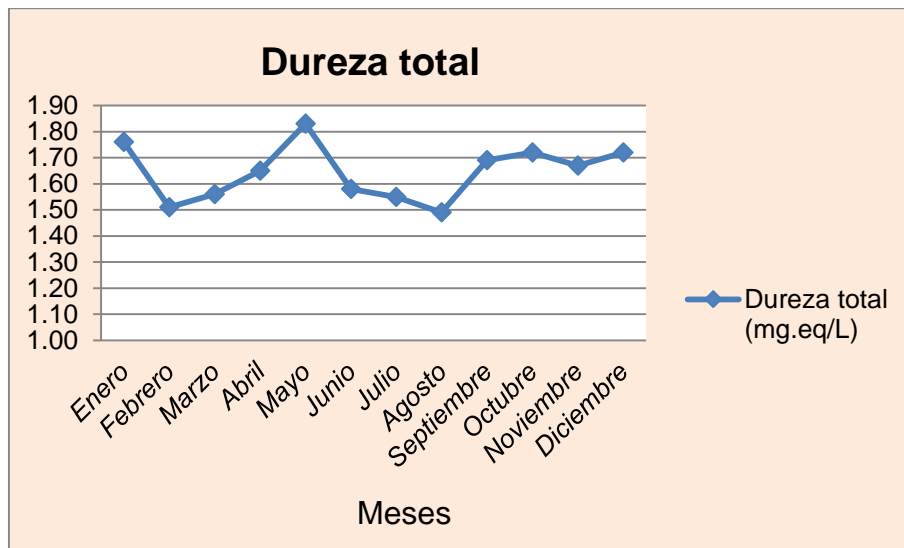


Figura 3.3. Comportamiento de los valores de dureza total en las aguas de captación pertenecientes al río Moa.

3.2.5 Alcalinidad (mg/L)

La alcalinidad es la medida de la capacidad del agua para mantener su pH estable frente a la adición de un ácido o una base. Las determinaciones de alcalinidad pueden dar estimaciones exactas de las concentraciones de los iones de bicarbonato y de carbonato. Según la NC: 93-11-2.1986, los valores se encuentran dentro de los límites máximos admisibles (<100 mg/L). Los mayores contenidos de alcalinidad se presentan en los meses de mayo, junio, julio y agosto. Figura 3.4.

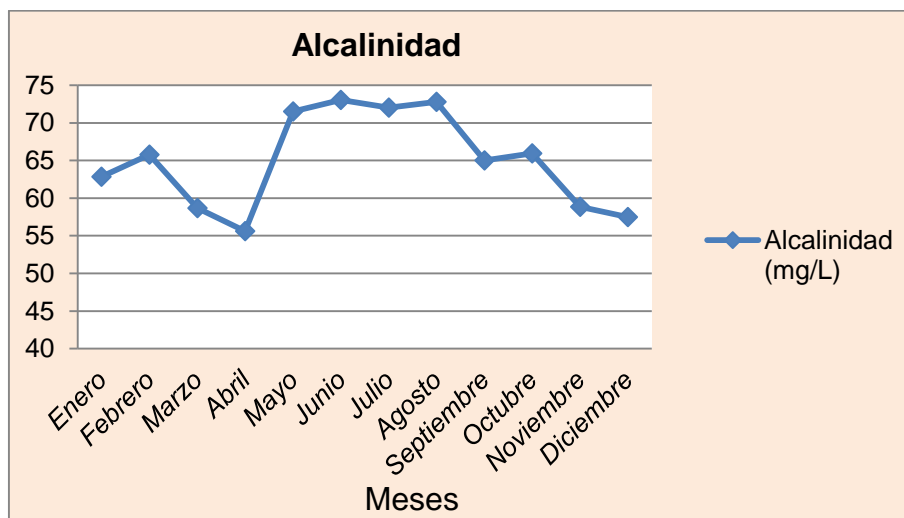


Figura 3.4. Comportamiento de la alcalinidad en las aguas de captación pertenecientes al río Moa.

3.2.6 Color (Pt/Co)

Las causas más comunes del color del agua son la presencia de hierro y manganeso coloidal o en solución; el contacto del agua con desechos orgánicos, hojas, madera, raíces, etc., en diferentes estados de descomposición, y la presencia de algunos residuos industriales. La remoción del color es una función del tratamiento del agua y se practica para lograr un agua adecuada para usos generales o industriales.

Los resultados obtenidos por el laboratorio están expresados en unidades de color escala platino – cobalto (Pt/Co). Los resultados del color en los 12 meses analizados se encuentran por encima de lo establecido por las normas NC: 827: 2017 y la (OMS, 2006), siendo valores mayores de 15 UC (Figura 3.5). Los valores del color real oscilan entre 42,00 y 270,00 Pt/Co correspondiente a un mínimo y un máximo en los meses de julio y mayo respectivamente.

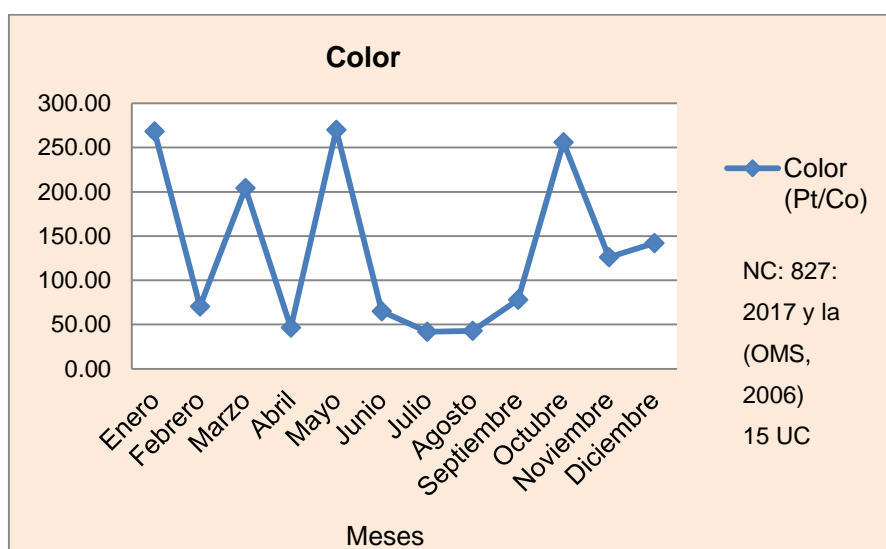


Figura 3.5. Comportamiento del color en las aguas de captación pertenecientes al río Moa.

3.2.7 Turbidez (NTU)

La turbidez en un agua puede ser causada por una gran variedad de materiales en suspensión, que varían en tamaño desde dispersiones coloidales hasta partículas gruesas, entre otros, arcillas, limo, materia orgánica e inorgánica finamente dividida, organismos planctónicos, microorganismos, etc (Castrillón Bedoña y Giraldo, 2012). Los aportes de aguas turbias de escorrentía en épocas de lluvias

ricas en materias minerales, causan aumentos de turbidez en las aguas del río, es precisamente este último factor el condicionante de los elevados valores de estas propiedades del agua, en los meses donde se registra la mayor pluviometría en la zona de estudio.

Los valores de turbidez oscilan entre 7,02 y 65,3,00 NTU correspondientes a un mínimo y un máximo en los meses de julio y mayo respectivamente. Figura 3.6.

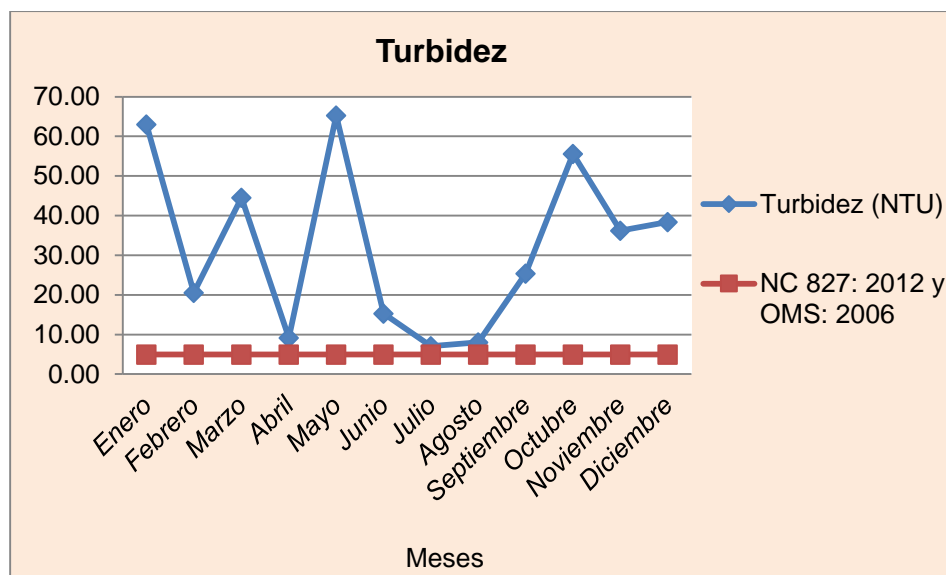


Figura 3.6. Comportamiento de la turbidez en las aguas de captación pertenecientes al río Moa.

3.2.8 Conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$)

La conductividad es la capacidad del agua de conducir la electricidad. En las aguas naturales se puede correlacionar con la cantidad de sólidos disueltos ya que estos son en su mayoría compuestos iónicos de calcio y magnesio. Los valores de conductividad oscilan entre 145.80 y 184.5 $\mu\text{s}/\text{cm}$ correspondientes a un mínimo y un máximo en los meses de julio y diciembre respectivamente.

Según la NC: 93-11-2.1986, los valores se encuentran dentro de los límites máximos admisibles (120-200 $\mu\text{s}/\text{cm}$) Figura 3.7.

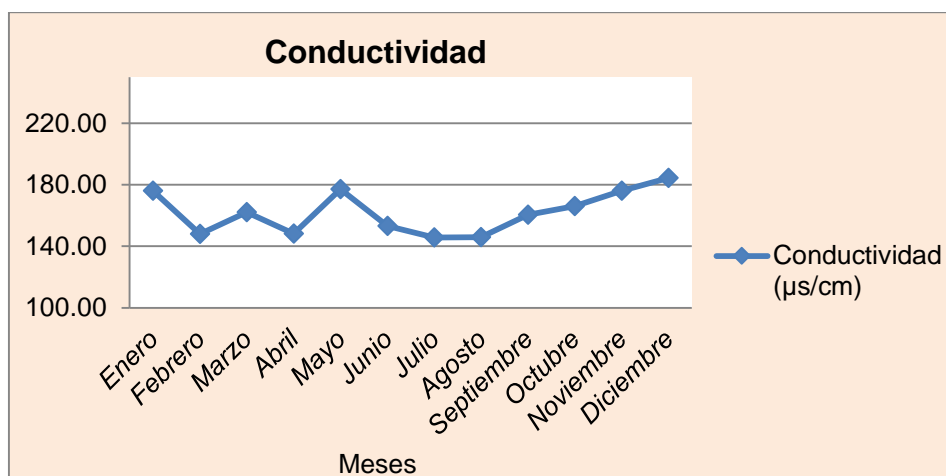


Figura 3.7 Comportamiento de la conductividad en las aguas de captación pertenecientes al río Moa.

3.2.9 Sólidos Totales Disueltos (STD)

Los sólidos totales disueltos (STD) tienen un comportamiento similar a la conductividad, puesto que refieren los mayores valores en los meses de enero, mayo, noviembre y diciembre cuando se registran altas precipitaciones. Esto es debido a una alta mineralización en la composición de las aguas superficiales, producto de la carga de sedimentos aportados por las precipitaciones y el escurrimiento superficial. Los valores oscilan entre 66.17 y 85,00 mg/L. Figura 3.8.

De acuerdo a la NC 827/:2017, la NC 1021: 2014 y la (OMS, 2006) los contenidos de STD se encuentran por debajo del límite admisible (1000 mg/L), por lo que el agua se considera potable.

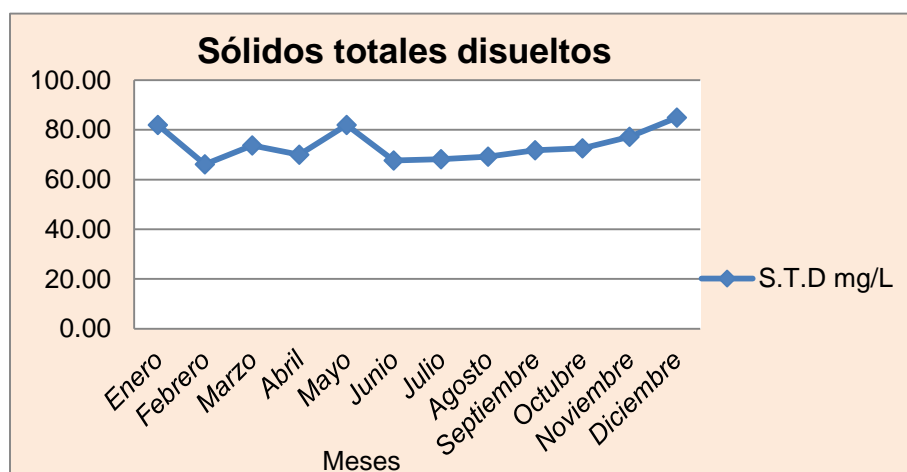


Figura 3.8 Comportamiento de los sólidos totales disueltos en las aguas de captación del río Moa.

3.2.10 Temperatura (°C)

La temperatura en los meses analizados se relaciona con la temperatura ambiente dependiendo del lugar y momento de la medida. Sus variaciones en general se deben a factores como: hora del día, estación y profundidad del agua, entre otros. El análisis estadístico reportó un valor mínimo 23,00°C y un máximo de 26,67°C. La media de los valores analizados es 25,07 °C. (Figura 3.9). No obstante, son consideradas como aguas tibias por estar entre los valores 20 y 37 °C, según la clasificación establecida en (De Miguel Fernández, 2012). La temperatura alta del agua potencia la proliferación de microorganismos y puede aumentar los problemas de sabor, olor, color y corrosión. Figura 3.9.

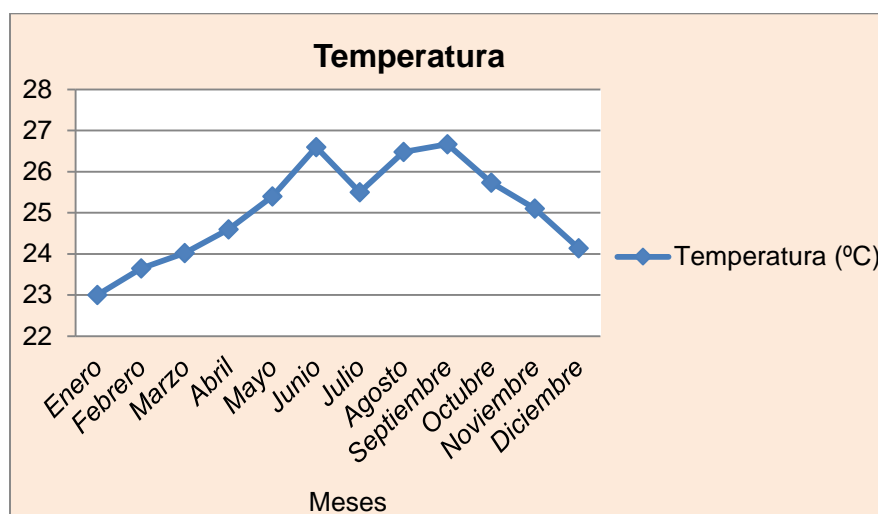


Figura 3.9. Comportamiento de la temperatura en las aguas de captación pertenecientes al río Moa.

3.2.11 Materia Orgánica, Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅) y Demanda Química de Oxígeno (DQO).

Los principales elementos que forman parte de la materia orgánica son el carbono, el hidrógeno, el oxígeno y el nitrógeno. Gran parte de dicha materia se encuentra en las rocas de forma disgregada, y su mayor cantidad está en la capa vegetal, directamente relacionada con la vegetación (De Miguel Fernández, 2012). En las aguas del río, puede ser originada por la descomposición del material biológico procedente de animales, plantas y microorganismos. Los valores de materia orgánica en los meses analizados varían entre 1,44 y 2,60 mg/L. Según la NC: 93-

11-2.1986, los valores se encuentran dentro de los límites máximos admisibles (<3mg/L) Figura 3.7.

La Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅) es un parámetro que representa la materia orgánica biodegradable. Esta es una medida de la estimación de las materias oxidables presentes en el agua, cualquiera que sea su origen orgánico o mineral como el hierro, nitritos, amoníaco, sulfuro y cloruro (Casilla Quispe, 2014). Los valores obtenidos de DBO₅ oscilan entre 0.25 y 1,81 mg/L, cumpliendo con los valores establecidos (4mg/L) según la NC 1021: 2014. Figura 3.7.

La Demanda Química de Oxígeno (DQO) es una estimación de las materias oxidables presentes en el agua, cualquiera que sea su origen, orgánico y mineral. La relación entre DBO y DQO es significativa de la biodegradabilidad de la materia orgánica (De Miguel Fernández, 2012). Los valores de la DQO oscilan entre 26,06 y 45,2 mg/L. Figura 3.10.

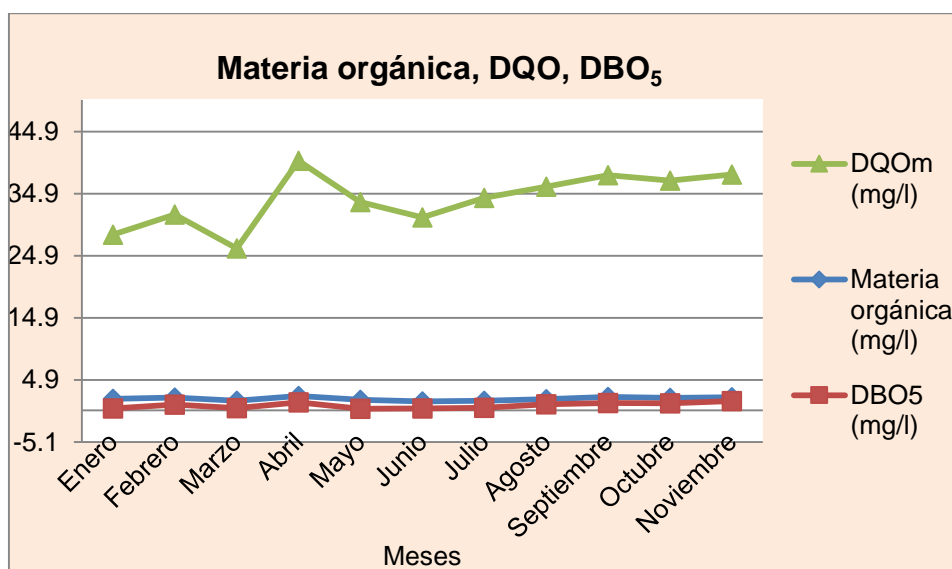


Figura 3.10 Comportamiento de la materia orgánica, la DBO₅ y la DQO en las aguas de captación pertenecientes al río Moa.

3.2.12 Calcio (Ca²⁺)

La distribución del calcio es muy amplia; se encuentra en casi todas las áreas terrestres del mundo. Su comportamiento es bastante estable en cada uno de los meses, los valores oscilan entre 3,41 y 5,72 mg/L se encuentran los mismos por

debajo de los límites establecidos (200,00 mg/L) por la Norma Cubana 827:2017. Figura 3.11.

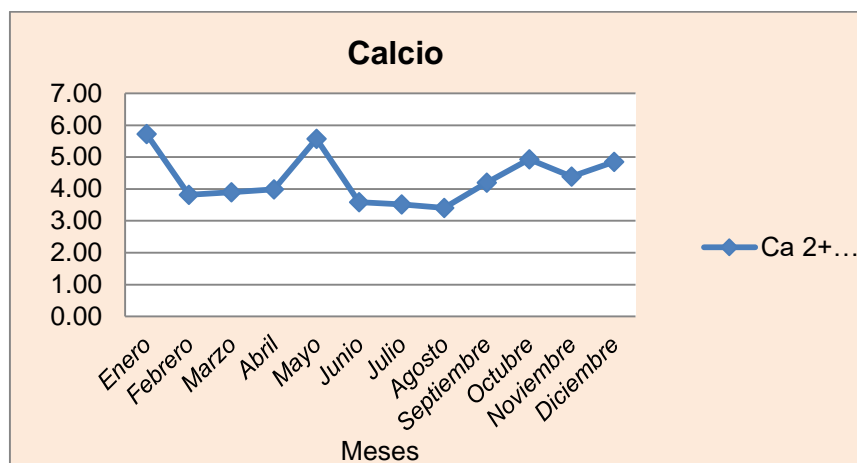


Figura 3.11. Comportamiento del calcio en las agua de captación pertenecientes al río Moa.

Este elemento es esencial para la vida de las plantas y animales, ya que está presente en los dientes, en la cáscara de los huevos, en el coral y en muchos suelos. El calcio trabaja conjuntamente con el magnesio para formar nueva masa ósea.

3.2.13. Magnesio (Mg^{2+})

Un gran número de minerales contienen magnesio, por ejemplo la dolomita (carbonato de calcio y magnesio, $(Ca\ Mg)\ (CO_3)_2$ y la magnesita (carbonato de magnesio $MgCO_3$). El magnesio tiene muchos propósitos y consecuentemente finaliza en el agua de maneras muy distintas, también finaliza en el medio ambiente como fertilizante y como alimentación de ganados (Casilla Quispe, 2014). En los meses analizados, se comporta por debajo de los valores establecidos según la Norma Cubana NC: 827:2017 donde el límite máximo admisible es de 150 mg/L. Figura 3.12.

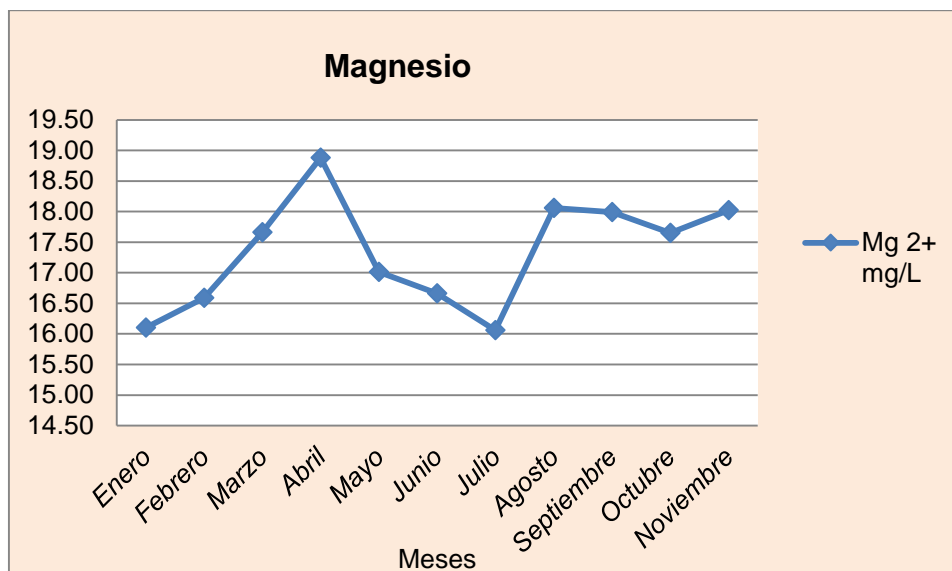


Figura 3.12. Comportamiento del magnesio en las aguas de captación pertenecientes al río Moa.

3.2.14 Sodio y Potasio

El sodio Na^+ es liberado por la meteorización de silicatos tipo albita. Su presencia en aguas naturales es muy variable pudiendo alcanzar hasta 120 000 mg/L en zonas evaporíticas, sin embargo, raramente sobrepasa 150 mg/L en aguas dulces normales (De Miguel Fernández, 2012). A temperatura ambiente (25°C), el umbral gustativo promedio del sodio según la norma de la OMS: 2006 y la Norma Cubana NC: 827:2017 es de 200 mg/L. Los valores en los meses estudiados oscilan entre 4,89 y 6,82 mg/L encontrándose por debajo de los límites admisibles por ambas normas.

El potasio K^+ procede de la meteorización de los feldespatos y ocasionalmente de la solubilización de depósitos de evaporitas, en particular de sales tipo silvina (KCl) o carnalita (KMgCl_2). Tiende a ser fijado irreversiblemente en procesos de formación de arcillas y de adsorción en la superficie de minerales con alta capacidad de intercambio iónico. En ocasiones, concentraciones más altas de 10 mg/L pueden ser indicio de contaminación por vertidos de aguas residuales (De Miguel Fernández, 2012). Las concentraciones obtenidas en los análisis de laboratorio indican que los valores de potasio oscilan entre 0,45 y 1,06 mg/L. La media es de 0,77 mg/L. (Figura 3.13)

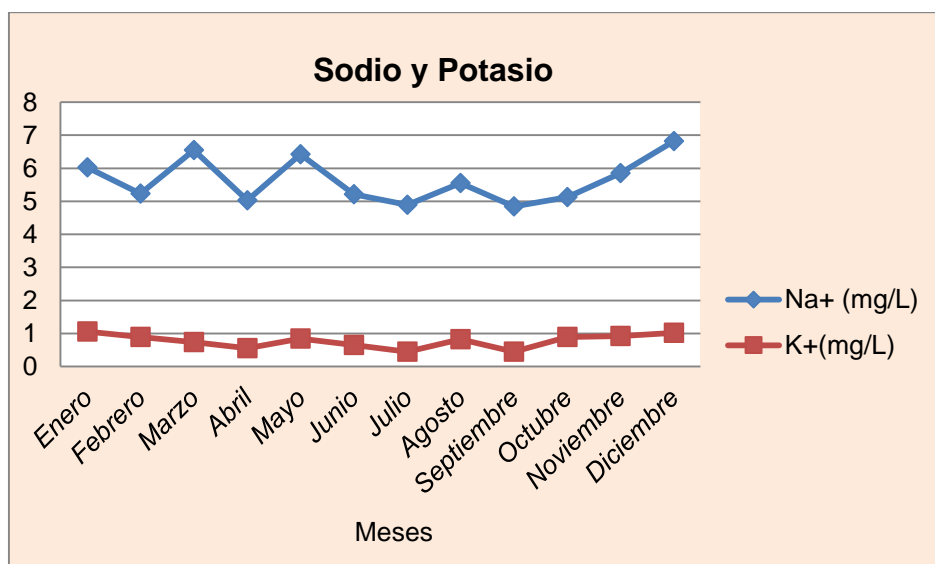


Figura 3.13. Comportamiento del sodio y el potasio en las aguas de captación pertenecientes al río Moa.

3.2.15 Cloruros (Cl^-)

El ion cloruro es uno de los iones más difundidos en las aguas naturales. Es un indicador de contaminación de las aguas debido a la acción del hombre. Esto es así porque, aunque la concentración de cloruro en aguas naturales es muy variable pues depende de las características de los terrenos que atraviesan, dicha concentración es menor comparada con la concentración del ion en aguas residuales ya que la actividad humana incrementa necesariamente dicha concentración. Los contenidos en cloruros de las aguas naturales no suelen sobrepasar los 50-60 mg/L de consumo. Un contenido elevado de cloruros puede dañar las conducciones y estructuras metálicas (Casilla Quispe, 2014).

Los valores en los meses analizados oscilan entre 14,59 y 17,84 mg/L, encontrándose por debajo de los límites permisibles por las Norma Cubana NC: 827: 2017 y OMS: 2006 (250 mg/L). Figura 3.14.

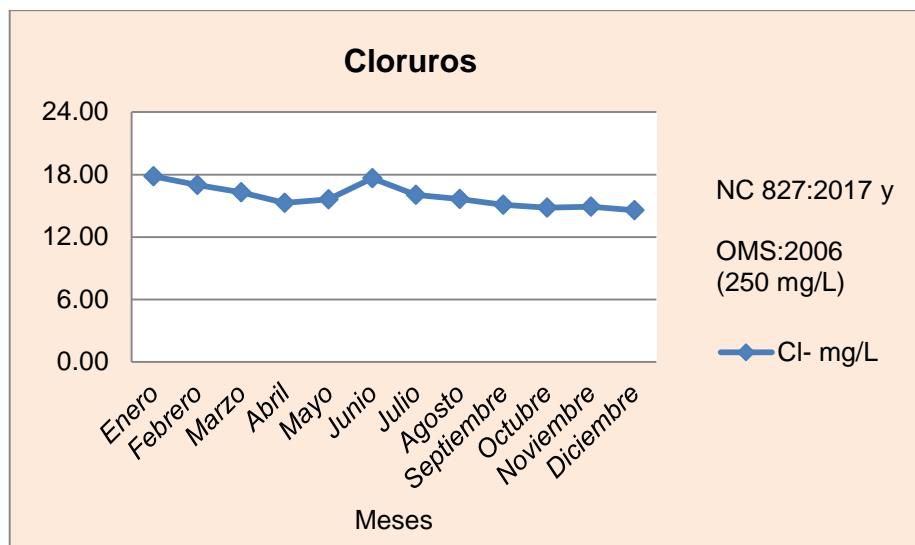


Figura 3.14. Comportamiento del cloruro en las aguas de captación pertenecientes al río Moa.

3.2.16 Hierro (Fe^{2+})

El hierro es uno de los metales más abundantes de la corteza terrestre y es un elemento esencial en la nutrición humana. También puede haber hierro en el agua de consumo debido a la utilización de coagulantes de hierro o a la corrosión de tuberías de acero o hierro colado durante la distribución del agua.

Según los resultados obtenidos de los análisis de laboratorio, se reportan valores entre 0,51 y 2,80 mg/L, representado un mínimo y un máximo en los meses de abril y enero respectivamente. Ninguno de los resultados obtenidos cumple con la Norma Cubana NC: 827: 2017 que establece como valor máximo 0,3 mg/L. El aumento del contenido de hierro se debe al incremento de las precipitaciones, el escurrimiento superficial, a las litologías de la zona y los procesos erosivos acelerados aún más por el desarrollo de la actividad minera. Figura 3.15.

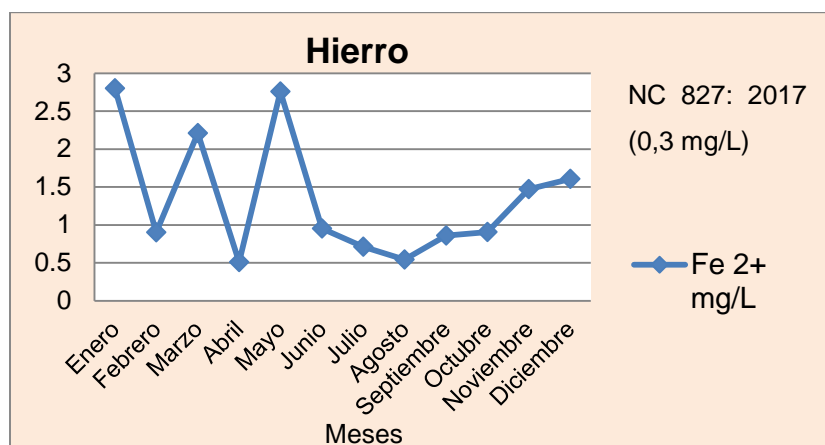


Figura 3.15. Comportamiento del hierro en las aguas de captación pertenecientes al río Moa.

3.2.17 Manganeseo (Mn^{2+})

El manganeso Mn^{2+} es un veneno y su nocividad está asociada generalmente a la exposición ocupacional al polvo de manganeso. Los valores de manganeso, de acuerdo a los resultados del laboratorio, varían entre 0,001 y 0,012 mg/L, encontrándose por debajo de los límites establecidos (0,1mg/L) según la Norma Cubana NC: 827: 2017 y la OMS: 2006 (0,5mg/L). Figura 3.16.

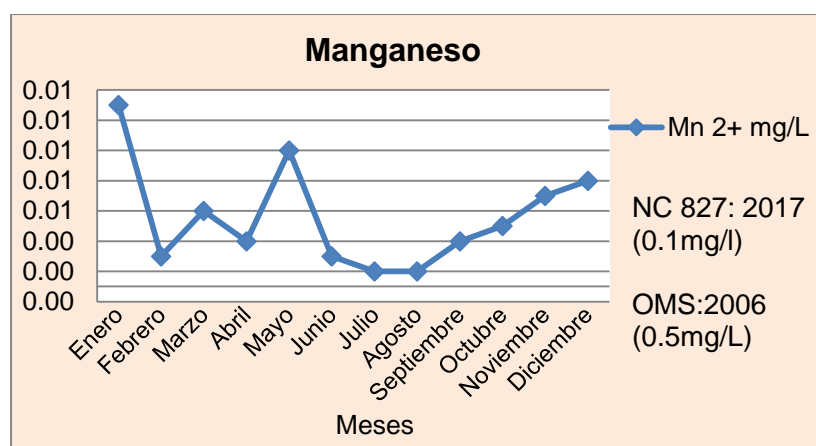


Figura 3.16. Comportamiento del manganeso en las aguas de captación pertenecientes al río Moa.

Su deficiencia en animales y personas puede alterar la reproducción, deformidades de los huesos y desórdenes del sistema nervioso o retraso del crecimiento (De Miguel Fernández, 2012).

3.2.18 Aluminio (Al^{3+})

Las fuentes más comunes de aluminio en el agua de consumo son el aluminio de origen natural y las sales de aluminio utilizadas como coagulantes en el tratamiento del agua. La presencia de aluminio en concentraciones mayores que 0,1–0,2 mg/L suele ocasionar quejas de los consumidores como consecuencia de la precipitación del flóculo de hidróxido de aluminio en los sistemas de distribución y el aumento de la coloración del agua por el hierro. Por lo tanto, es importante optimizar los procesos de tratamiento con el fin de reducir al mínimo la presencia de residuos de aluminio en el sistema de abastecimiento. Los valores de aluminio oscilan entre 0,024 y 0,080 mg/L, encontrándose estos resultados por debajo de los límites establecidos (0,2 mg/L) según la Norma Cubana NC: 827: 2017 y la OMS, 2006. Figura 3.17.

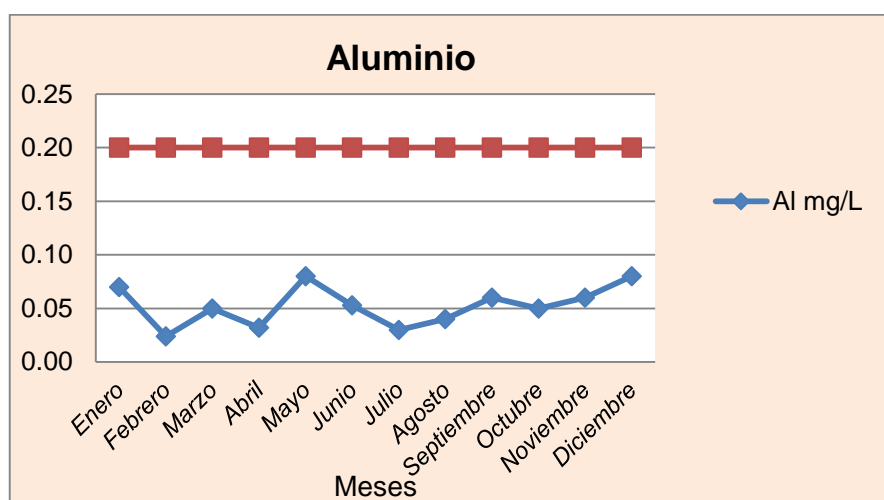


Figura 3.17. Comportamiento del aluminio en las aguas de captación pertenecientes al río Moa.

3.2.19 Níquel (Ni^{2+})

Aparentemente algunas formas del níquel no son tóxicas para los humanos, pero la forma gaseosa carbonilo de níquel es altamente tóxica. Se sospecha que es carcinogénico (De Miguel Fernández, 2012). Un aumento del pH para controlar la corrosión de otros materiales también debería reducir la contaminación por níquel (OMS, 2006). En los meses analizados los contenidos de níquel oscilan entre 0,011 y 0,090 mg/L correspondiente a un mínimo y máximo en los meses de junio

y enero respectivamente. Según la Norma Cubana NC: 827: 2017 y la Norma de OMS, 2006 establecen que el rango permisible es de 0,02 mg/L. De los valores analizados en cada uno de los meses, solo cumplen con las normas los meses de junio, julio, agosto y febrero que registran la menor pluviometría.

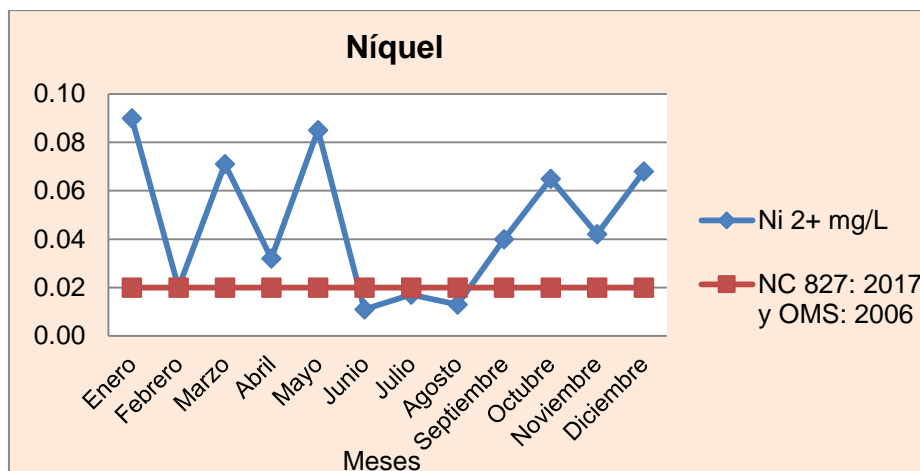


Figura 3.18. Comportamiento del níquel en las aguas de captación pertenecientes al río Moa.

3.2.20 Sulfatos (SO_4^{2-})

Los sulfatos se producen de forma natural en las aguas subterráneas y están a menudo presentes en los suministros de agua potable para uso doméstico. Cuando la cantidad de sulfatos excede los niveles normales, las personas pueden sufrir efectos en su salud, en particular problemas gastrointestinales (Casilla Quispe, 2014).

De los resultados obtenidos por el laboratorio se observa que los valores de sulfato varían entre 6,56 y 17,49 mg/L, encontrándose por debajo del límite admisible establecido por la norma cubana NC 827: 2017 (400,00 mg/L) y la norma de la (OMS, 2006) (300,00 mg/L). Figura 3.19.

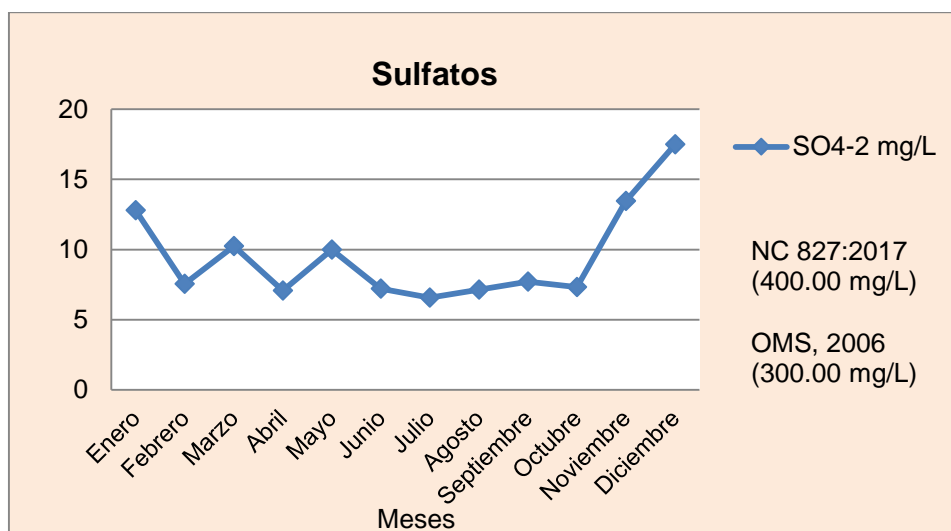


Figura 3.19. Comportamiento del sulfato en las aguas de captación pertenecientes al río Moa.

3.2.21 Hidrocarbonatos (HCO_3^-) y carbonatos (CO_3^{2-})

Con pH superior a 8,3 existirán los carbonatos, los cuales precipitan fácilmente en presencia de iones de calcio. Estos iones contribuyen fundamentalmente a la alcalinidad del agua, que es una medida de la capacidad para neutralizar ácidos (De Miguel Fernández, 2012). Los valores de carbonatos en los meses analizados varían entre 6,00 y 18,00 mg/L. Figura 3.20.

Según la NC: 93-11-2.1986, los valores se encuentran por encima de los límites admisibles (0.00 mg/L).

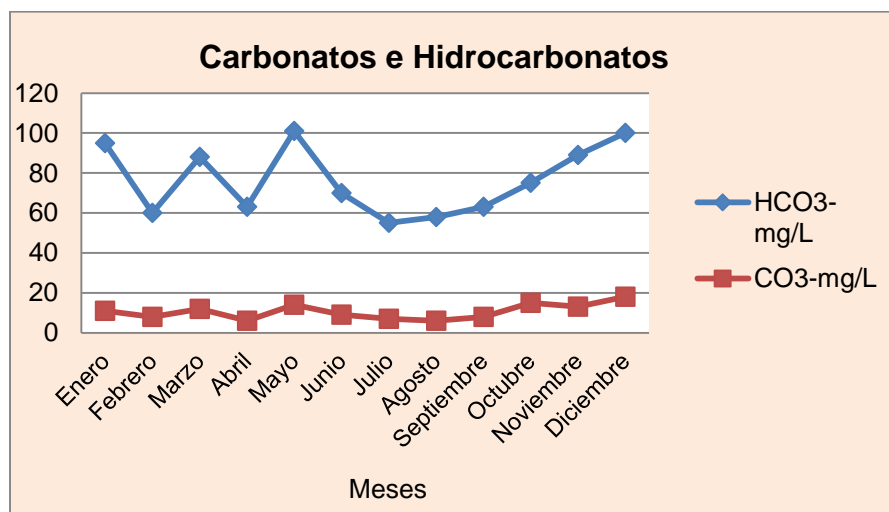


Figura 3.20. Comportamiento de los carbonatos e hidrocarbonatos en las aguas de captación pertenecientes al río Moa.

Los valores de hidratos oscilan entre 55,00 mg/l en el mes de julio y 100,00 mg/l en diciembre, correspondientes a un mínimo y un máximo respectivamente. Según la NC: 93-11-2.1986, los valores se encuentran dentro los límites máximos admisibles (100 mg/L). Figura 3.20.

3.2.22 Nitritos (NO_2^-)

Los nitritos son iones de origen natural que forman parte del ciclo del nitrógeno. Las condiciones anaerobias pueden favorecer la formación y persistencia de los nitritos. Su formación es consecuencia de la actividad microbiana y puede ser intermitente. La nitrificación en los sistemas de distribución puede aumentar la concentración de nitrato, que suele ser de 0,2 a 1,5 mg/L (OMS, 2006). Al evaluar los resultados químicos de las aguas en cada uno de los meses, las concentraciones de nitritos se encuentran por encima de los límites permisibles (0,00 mg/L) establecidos por la norma de la OMS, 2006. De acuerdo a la NC: 827:2017 se encuentran en el límite permisible las aguas en los meses de febrero y julio. En los restantes meses los valores se encuentran sobrepasando los límites. Figura 3. 21.

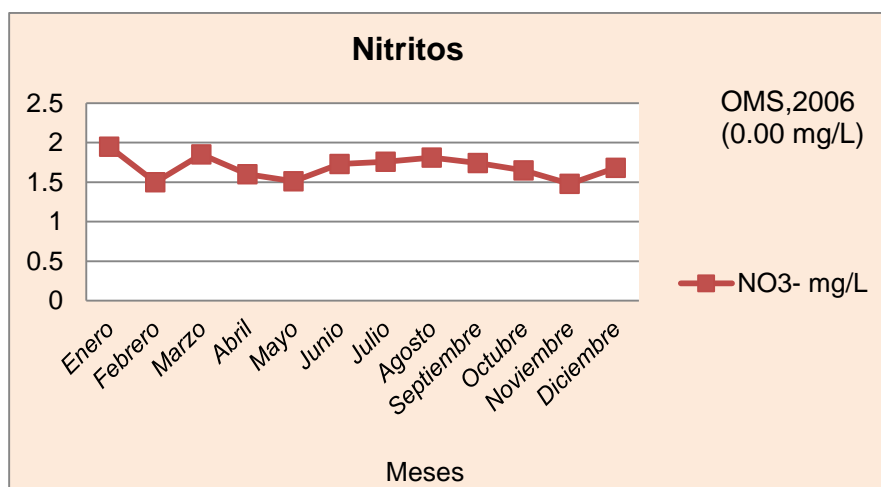


Figura 3.21. Comportamiento de los nitritos en las aguas de captación pertenecientes al río Moa

3.2.23 Nitratos (NO_3^-)

Al igual que los nitritos son iones de origen natural que forman parte del ciclo del nitrógeno. El nitrato se utiliza principalmente en fertilizantes inorgánicos. La

concentración de nitrato en aguas subterráneas y superficiales suele ser baja, pero puede llegar a ser alta por filtración o escorrentía de tierras agrícolas o debido a la contaminación por residuos humanos o animales como consecuencia de la oxidación del amoníaco y fuentes similares.

Al analizar los resultados de la composición química para el nitrato, las aguas en cada uno de los meses se encuentran en los rangos permitidos por la norma cubana NC: 827: 2017 (45 mg/L) y por la norma de la OMS: 2006 (50 mg/L). (Figura 3.22)

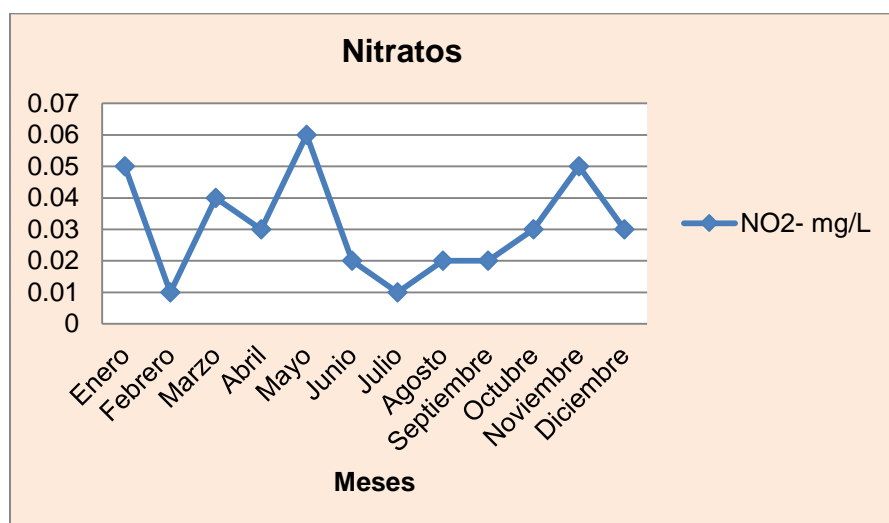


Figura 3.22. Comportamiento de los nitritos en las aguas de captación pertenecientes al río Moa

3.3 Evaluación de los resultados de los análisis bacteriológicos.

Los agentes patógenos transmitidos por el agua constituyen un problema mundial que demanda un urgente control. La determinación de microorganismos en el agua de consumo y su concentración proporcionan herramientas de control, indispensables para la toma de decisiones. El control de la calidad microbiológica del agua de consumo humano (ACH) requiere del análisis de microorganismos patógenos, lo cual se dificulta, debido a la gran variedad de bacterias patógenas cultivables, la complejidad de los ensayos de aislamientos, la baja concentración de varias especies muy agresivas y la necesidad de laboratorios especializados; además de demandar varios días de análisis y un costo elevado. Frente a la

necesidad de hacer una evaluación sencilla, rápida, económica y fiable de la presencia de patógenos, la vigilancia de la calidad del agua se efectúa mediante la búsqueda de indicadores de contaminación fecal aprobados por los Estándares Internacionales y Nacionales (Robert Pullés, 2014).

Según la norma cubana NC: 827: 2017 (< 2 NMP/100 mL) los contenidos de coliformes termotolerantes en los meses de febrero, abril, junio, julio y agosto se encuentran por debajo de los límites admisibles. Los mayores contenidos que oscilan entre 2,01 y 2,39 NMP/100 mL, se reportan en los meses de enero, marzo, mayo, septiembre, octubre, noviembre y diciembre. Son precisamente estos meses los que registran la mayor pluviometría, favoreciendo un mayor arrastre de materias orgánicas.

Los valores de coliformes totales reportan el mismo valor en cada uno de los meses, 16,00 NMP/100 mL. Según la norma NC: 827: 2017 (< 2 NMP/100 mL), este valor se encuentran por encima de los rangos permitidos. Tabla 3.6

Tabla 3.6. Resultados de los análisis bacteriológicos.

Meses	Coliformes Termotolerantes (NMP/100 mL)	Coliformes Totales (NMP/100 mL)
Enero	>2.19	>16
Febrero	>1.89	>16
Marzo	>2.11	>16
Abril	>1.98	>16
Mayo	>2.09	>16
Junio	>1.50	>16
Julio	>1.30	>16
Agosto	>0.99	>16
Septiembre	>2.01	>16
Octubre	>2.07	>16
Noviembre	>2.18	>16
Diciembre	>2.21	>16

NMP/100mL: número más probable.

3.4 Evaluación de la calidad de las aguas del río Moa a través del ICA según Montoya.

El Índice de Calidad de Agua (ICA) fue calculado con el objetivo de hacer una evaluación general sobre el estado de la calidad de las aguas en el área de estudio. Para esto se empleó el ICA propuesto por Montoya, escogido por sus diversos empleos en otras investigaciones y facilidad de trabajar con él, a pesar de que no se tengan todos los parámetros para su cálculo. Además, se considera como uno de los más completos e integradores, y por ser de los pocos con connotaciones legales para las aguas de consumo humano e industrial en Centro América.

Para la realización del cálculo se emplearon los contenidos de conductividad, pH, cloruro, dureza total como carbonato de calcio (CaCO_3), sólidos totales disueltos, color, turbidez, coliformes totales, coliformes fecales y DBO_5 con pesos de importancia de 4.0, 4.0, 1.0, 0.1, 2.0, 4.0, 4.0, 0.5, 0.5 y 0.2 respectivamente. A partir de los resultados obtenidos por la metodología de Montoya, las aguas en cada uno de los meses analizados se clasifican como aceptables (enero, febrero, abril, junio, julio y agosto), los valores del ICA oscilan entre 70.35 % y 83.20 %. En este caso las aguas requieren una ligera purificación para consumo humano. En relación al agua destinada para la industria, solo se requiere en algunos procesos, tales como el tratamiento químico en la termoeléctrica para obtener agua suavizada y agua desmineralizada para los diferentes procesos.

En el caso de las aguas clasificadas como poco contaminadas (marzo, mayo, septiembre, octubre, noviembre y diciembre), los valores del ICA fluctúan entre 63.71 % y 68.69 %. El aumento de la pluviometría conjuntamente con las características del terreno ya alterado por la influencia de la actividad minera, justifica los bajos valores de índices de calidad en estos meses del año 2018. Son precisamente estos los que reportan las mayores precipitaciones, incluido además el mes de enero. (Ver Figura 3.23). De acuerdo a la clasificación dado su uso establecida por Montoya, requieren una mayor necesidad de tratamiento para consumo humano y a escala industrial, no requiere tratamiento para la industria normal.

Se analizaron los valores del ICA estadísticamente, determinándose que el mínimo valor corresponde al mes de mayo con 63.71 %, el máximo se encuentra en el mes de enero con 82.3 %, la media que posee es de 69.52 %, la varianza es 29.69 % y el promedio es de 70.03 %, lo que refleja que en la gran mayoría de los meses el agua se clasifica como aceptable.

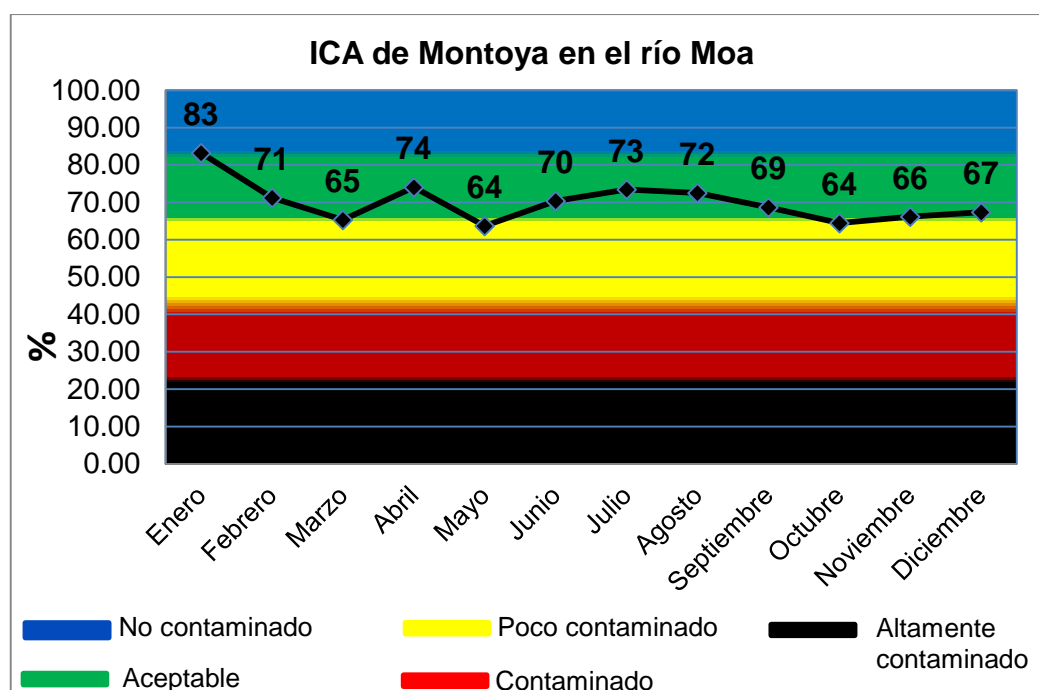


Figura 3.23. Resultados del Índice de Calidad de Montoya en el río Moa.

3.5. Evaluación del consumo de reactivos químicos para el tratamiento de potabilización de las aguas para consumo humano e industrial.

En el análisis de los resultados obtenidos por el laboratorio, se hace evidente la influencia que ejerce los factores naturales y antrópicos en la calidad de las aguas del río Moa. Para lograr que las propiedades físico-químicas y bacteriológicas de estas aguas cumplan con las normas de consumo establecidas, se aplican las dosis de reactivos químicos teniendo en cuenta no solo las normas de consumo sino también la calidad del agua a tratar.

A continuación se presenta el promedio de consumo cada uno de los reactivos químicos en los meses del año 2018. Según las normas establecidas, tenemos que en los meses de enero, mayo, octubre, noviembre y diciembre hay un

aumento en el consumo de sulfato de aluminio y cloro gaseoso. Son precisamente estos meses los que reportan las mayores variaciones en cuenta a sus propiedades físico-químicas y bacteriológicas, así como las mayores pluviometrías Tabla 3.7.

Tabla 3.7. Promedio del consumo de reactivos químicos por meses en el año 2018.

Meses	Sulfato de aluminio (mg/l)	Cal hidratada (mg/l)	Floculante A-130 (mg/l)	Cloro gaseoso (mg/l)
Enero	26.51	9.51	0.20	2.69
Febrero	14.47	4.46	0.17	1.92
Marzo	17.71	6.06	0.18	2.20
Abril	13.69	4.89	0.17	1.96
Mayo	25.87	9.30	0.20	2.44
Junio	12.67	3.71	0.15	1.72
Julio	13.29	4.55	0.17	1.84
Agosto	12.08	4.20	0.15	1.51
Septiembre	15.71	6.64	0.18	1.98
Octubre	24.69	8.95	0.20	2.31
Noviembre	22.45	9.03	0.20	2.33
Diciembre	23.27	7.91	0.19	2.25

3.6. Influencia de los factores naturales y antrópicos en la calidad de las aguas utilizadas en el proceso de tratamiento de potabilización.

Las precipitaciones constituyen un factor importante en el área de estudio, dada la influencia que ejercen sobre la calidad de las aguas del río Moa. En las áreas deforestadas por la actividad minera, el escurrimiento superficial y las pendientes abruptas favorecen el transporte y carga de sedimentos hasta el río. Esto propicia los altos contenidos de color, turbidez y sólidos totales disueltos, y de compuestos metálicos como el hierro, níquel, manganeso. El poder disolvente del agua propicia la disolución de estos compuestos presentes en las litologías de la zona, que se encuentran alteradas debido a los procesos de erosión y meteorización.

Con el objetivo de establecer un análisis del comportamiento de las precipitaciones en el área de estudio y el consumo de reactivos químicos en el proceso de tratamiento para potabilización desde enero a diciembre en el año 2018, se realizó un análisis de las precipitaciones de los pluviómetros ubicados en la Derivadora Moa, Presa Nuevo Mundo y Cayo Grande de Farallones. Se registran los mayores valores en los meses de enero, mayo y diciembre (Figura 3.23).

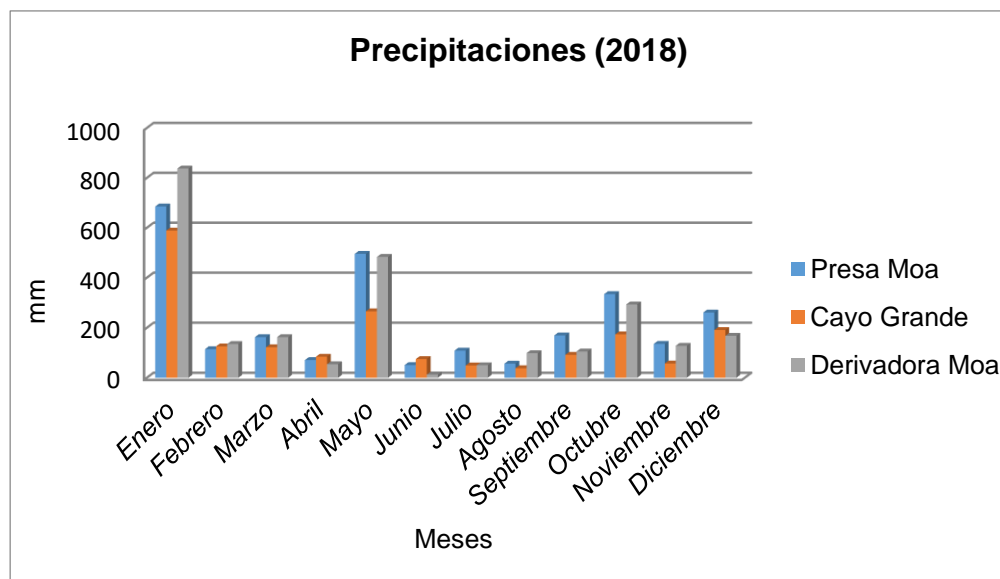


Figura 3.23. Comportamiento del total de precipitaciones registradas en los pluviómetros ubicados en el área de estudio (2018).

A partir del promedio de las precipitaciones en (mm) registradas y el promedio del consumo de reactivos químicos (mg/L) en el año 2018, se estableció un estudio comparativo que refleja la relación directamente proporcional que existe entre los diferentes parámetros Figura 3.24.

Una mayor demanda por concepto de insumos, viene dada por la relación entre precipitaciones, actividad minera y características naturales del terreno en el área de estudio. De esta forma se puede establecer que existe una mayor demanda de reactivos químicos en los meses de enero, mayo, octubre y diciembre, que son los que registran la mayor pluviometría.

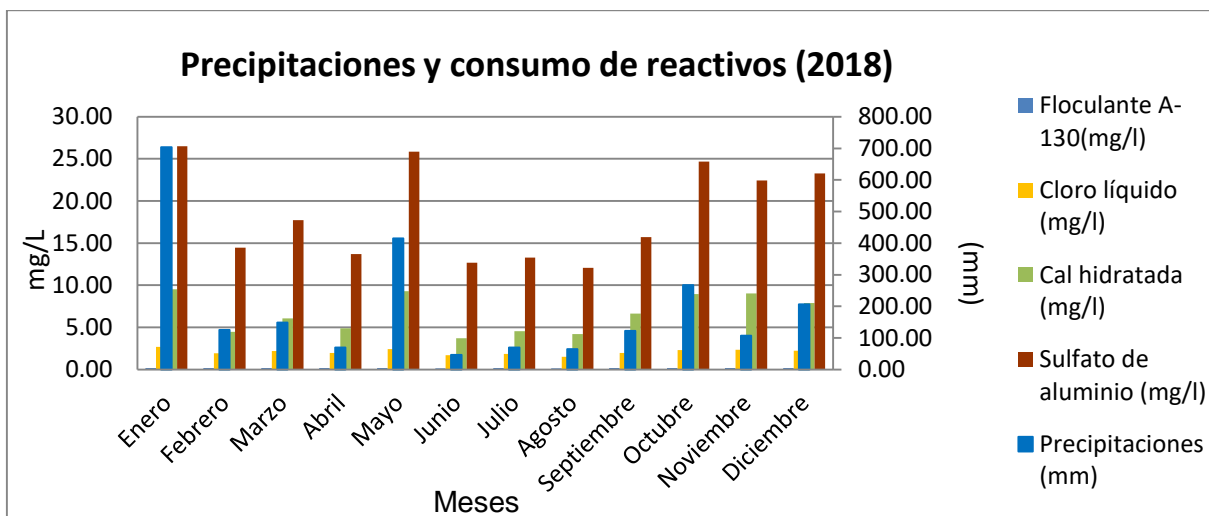


Figura 3.24. Comportamiento del promedio de precipitaciones y el consumo de reactivos químicos en el 2018.

3.7. Evaluación de los costos para el tratamiento de potabilización de las aguas para consumo humano e industrial por concepto de reactivos químicos.

En la planta el proceso de potabilización requiere del empleo de los diferentes reactivos para el correcto desarrollo del proceso. Se analizó el consumo físico para cada uno de los reactivos por meses en el 2018, teniendo en cuenta el índice de consumo calculado a partir de la prueba de jarras, de acuerdo a la Norma Cubana 827: 2017 que establece los índices máximos permisibles para los parámetros que aseguran una adecuada calidad del agua.

El ensayo de Jarras se cataloga como el método más utilizado para la determinación de la dosificación de coagulantes dentro del proceso de potabilización de aguas. Se ha implementado como una herramienta que permite ejercer un control más efectivo sobre el cálculo de la dosis, sin embargo el funcionamiento adecuado de este equipo se encuentra sujeto a la obtención de un punto óptimo de funcionamiento que en ocasiones es definido de manera errada (Sibiya, 2014). Tabla 3.8

Tabla 3.8. Normas de consumo establecidas para cada reactivo químico utilizado en el proceso de potabilización.

Reactivos químicos	Normas de consumo
Sulfato de aluminio $AlSO_4$	20.0 mg/l
Cal hidratada	10.0 mg/l
Floculante A-130	0.2 mg/l
Cloro gaseoso	2.2 mg/l

Para determinar el consumo físico por meses se utilizó la siguiente ecuación (3.1):

$$C_{físico}(X) = \frac{V_{H_2O\ potable} \cdot Ic(X)}{1\ 000\ 000} \quad (3.1)$$

Donde:

$C_{físico}(X)$: Consumo físico del reactivo, t

$V_{H_2O\ potable}$: Volumen de agua potable, m^3

$Ic(X)$: Índice de consumo del reactivo, mg/L

Se calculó el gasto planificado cada reactivo químico en el período de investigación, a través de la siguiente ecuación (3.2):

$$G_{plan(X)} = C_{t\ mes(X)} \cdot P_{t(X)} \quad (3.2)$$

Donde

$G_{plan(X)}$: Gasto planificado, CUP- CUC

$C_{t\ mes(X)}$: Cantidad de toneladas del reactivo consumidas por mes, t

$P_{t(X)}$: Precio del reactivo, t/CUP-t/CUC

Se utilizó el precio de los reactivos en CUP/t y CUC/t para el período comprendido.

Tabla 3.9

Tabla 3.9. Precios de los reactivos en CUP/t y CUC/t.

Reactivos	Precios	
	CUP/t	CUC/t
Cal Hidratada	166,26	181,22
Cloro Liquido	614,68	670,00
Floculante A-130	405	441,45
Sulfato de Aluminio	344,82	375,85

Se obtuvieron los siguientes resultados (Tablas 3.10 y 3.11) a partir de la ecuación (3.1) los cuales reflejan que en los meses de enero, mayo, octubre, noviembre y diciembre hay un sobreconsumo físico (t) de sulfato de aluminio y cloro gaseoso. Son precisamente estos meses los que registran los mayores valores de precipitaciones así como las mayores variaciones en las propiedades físico-químicas y bacteriológicas.

Tabla 3.10. Promedio del consumo físico de los reactivos (t).

Mes	Volumen de agua tratada (m ³)	Consumo físico de reactivos (t)							
		Sulfato de Aluminio		Cal Hidratada		Floculante A 130		Cloro Gaseoso	
		Plan	Real	Plan	Real	Plan	Real	Plan	Real
Enero	1571010	31.42	41.65	15.71	14.94	0.31	0.31	3.46	4.23
Febrero	1546044	30.92	22.37	15.46	6.90	0.31	0.26	3.40	2.97
Marzo	1697859	33.96	30.07	16.98	10.29	0.34	0.31	3.74	3.74
Abril	1685359	33.71	23.07	16.85	8.24	0.34	0.29	3.71	3.30
Mayo	1611774	32.24	41.70	16.12	14.99	0.32	0.32	3.55	3.93
Junio	1686431	33.73	21.37	16.86	6.26	0.34	0.25	3.71	2.90
Julio	1708875	34.18	22.71	17.09	7.78	0.34	0.29	3.76	3.14
Agosto	1768064	35.36	21.36	17.68	7.43	0.35	0.27	3.89	2.67
Septiembre	1639918	32.80	25.76	16.40	10.89	0.33	0.30	3.61	3.25
Octubre	1566029	31.32	38.67	15.66	14.02	0.31	0.31	3.45	3.62
Noviembre	1519116	30.38	34.10	15.19	13.72	0.30	0.30	3.34	3.54
Diciembre	1475843	29.52	34.34	14.76	11.67	0.30	0.28	3.25	3.32
Total	19476322	389.53	357.17	194.76	127.11	3.90	3.49	42.85	40.61

Tabla 3.11. Promedio del consumo físico (t) de sulfato de aluminio y cloro gaseoso en los meses de sobreconsumo.

Consumo físico (t)						
Mes	Sulfato de aluminio			Cloro gaseoso		
	Plan	Real	Desviación	Plan	Real	Desviación
Enero	31.42	41.65	10.23	3.46	4.23	0.77
Mayo	32.24	41.70	9.46	3.55	3.93	0.39
Octubre	31.32	38.67	7.34	3.45	3.62	0.17
Noviembre	30.38	34.10	3.72	3.34	3.54	0.20
Diciembre	29.52	34.34	4.83	3.25	3.32	0.07
Total	154.88	190.46	35.58	17.04	18.64	1.60

A partir de la ecuación (3.2) se obtuvieron los costos incurridos por concepto de reactivos químicos en CUP y CUC. (Tablas 3.12, 3.13, 3.14 y 3.15).

Tabla 3.12. Costo del consumo de reactivos (CUP).

Mes	Costo del consumo de reactivos (CUP)							
	Sulfato de Aluminio		Cal Hidratada		Floculante A 130		Cloro Gaseoso	
	Plan	Real	Plan	Real	Plan	Real	Plan	Real
Enero	10834.31	14360.88	2611.96	2483.98	127.25	127.25	2124.47	2597.65
Febrero	10662.14	7714.06	2570.45	1146.42	125.23	106.45	2090.71	1824.62
Marzo	11709.11	10368.42	2822.86	1710.65	137.53	123.77	2296.01	2296.01
Abril	11622.91	7955.88	2802.08	1370.22	136.51	116.04	2279.10	2030.47
Mayo	11115.44	14377.82	2679.74	2492.15	130.55	130.55	2179.60	2417.37
Junio	11630.30	7367.80	2803.86	1040.23	136.60	102.45	2280.55	1782.98
Julio	11785.09	7831.19	2841.18	1292.73	138.42	117.66	2310.90	1932.76
Agosto	12193.28	7364.74	2939.58	1234.62	143.21	107.41	2390.95	1641.06
Septiembre	11309.53	8883.64	2726.53	1810.41	132.83	119.55	2217.65	1995.89
Octubre	10799.96	13332.55	2603.68	2330.29	126.85	126.85	2117.73	2223.62
Noviembre	10476.43	11759.79	2525.68	2280.69	123.05	123.05	2054.29	2175.68
Diciembre	10178.00	11842.11	2453.74	1940.91	119.54	113.57	1995.78	2041.14
Total	134316.51	123158.88	32381.33	21133.32	1577.58	1414.59	26337.75	24959.24

Tabla 3.13. Costo del consumo de reactivos (CUC).

Mes	Costo del consumo de reactivos (CUC)							
	Sulfato de Aluminio		Cal Hidratada		Floculante A 130		Cloro Gaseoso	
	Plan	Real	Plan	Real	Plan	Real	Plan	Real
Enero	11809.40	15653.36	2847.04	2707.53	138.70	138.70	2315.67	2831.44
Febrero	11621.73	8408.32	2801.79	1249.60	136.50	116.03	2278.87	1988.83
Marzo	12762.94	11301.58	3076.92	1864.61	149.90	134.91	2502.65	2502.65
Abril	12668.97	8671.91	3054.26	1493.54	148.80	126.48	2484.22	2213.22
Mayo	12115.83	15671.82	2920.91	2716.45	142.30	142.30	2375.76	2634.93
Junio	12677.03	8030.90	3056.21	1133.85	148.89	111.67	2485.80	1943.45
Julio	12845.74	8536.00	3096.88	1409.08	150.88	128.25	2518.89	2106.70
Agosto	13290.67	8027.57	3204.15	1345.74	156.10	117.08	2606.13	1788.75
Septiembre	12327.39	9683.16	2971.92	1973.35	144.79	130.31	2417.24	2175.52
Octubre	11771.96	14532.48	2838.01	2540.02	138.26	138.26	2308.33	2423.75
Noviembre	11419.31	12818.18	2752.99	2485.95	134.12	134.12	2239.18	2371.50
Diciembre	11094.02	12907.90	2674.57	2115.59	130.30	123.79	2175.40	2224.84
Total	146404.99	134243.18	35295.65	23035.32	1719.56	1541.90	28708.15	27205.57

Tabla 3.14. Costo total del consumo de sulfato de aluminio y cloro gaseoso en los meses de sobreconsumo (CUP).

Costo del consumo de reactivos (CUP)						
Mes	Sulfato de aluminio			Cloro gaseoso		
	Plan	Real	Desviación	Plan	Real	Desviación
Enero	10834.31	14360.88	3526.57	2124.47	2597.65	473.18
Mayo	11115.44	14377.82	3262.38	2179.60	2417.37	237.77
Octubre	10799.96	13332.55	2532.59	2117.73	2223.62	105.89
Noviembre	10476.43	11759.79	1283.36	2054.29	2175.68	121.39
Diciembre	10178.00	11842.11	1664.10	1995.78	2041.14	45.36
Total	53404.15	65673.16	12269.01	10471.87	11455.46	983.59

Tabla 3.15. Costo total del consumo de sulfato de aluminio y cloro gaseoso en los meses de sobreconsumo (CUC).

Costo del consumo de reactivos (CUC)						
Mes	Sulfato de aluminio			Cloro gaseoso		
	Plan	Real	Desviación	Plan	Real	Desviación
Enero	11809.40	15653.36	3843.96	2315.67289	2831.43639	515.76
Mayo	12115.83	15671.82	3556.00	2375.76	2634.93	259.17
Octubre	11771.96	14532.48	2760.52	2308.33	2423.75	115.42
Noviembre	11419.31	12818.18	1398.87	2239.18099	2371.49624	132.32
Diciembre	11094.024	12907.8969	1813.87	2175.39648	2224.83731	49.44
Total	58210.52	71583.74	13373.22	11414.3404	12486.4502	1072.11

Con respecto a nivel anual, a pesar del sobreconsumo de reactivos que generó mayores gastos que los planificados, el costo real es inferior al costo plan, lo que demuestra que existe una compensación de unos meses con respecto a otros. Tablas 3.12 y 3.13.

De forma general se concluye que existió un sobreconsumo de sulfato de aluminio de **35,58 t** lo que conllevó a un sobregiro del presupuesto de **12 269.01 CUP** y **13 373.22 CUC**. El cloro gaseoso también reportó un sobreconsumo de **1,60 t** que propicia un sobregiro de **983,59 CUP** y **1072,11 CUC**. El costo ascendió a **13 252.60 CUP** y **14 445.33 CUC**, esto ocasiona un deterioro del presupuesto de gasto asignado en el proceso de tratamiento para potabilización en la planta a escala mensual. Tablas 3.13, 3.14 y 3.15.

3.8 Medidas de control que garanticen la calidad de las aguas del río Moa.

Con el fin de reducir al mínimo la probabilidad de que aparezcan irregularidades en las aguas de consumo humano e industrial, es preciso vigilar adecuadamente los sistemas de abastecimiento, tanto en condiciones normales como durante los períodos en los que se produce un deterioro transitorio de su calidad.

Tanto las circunstancias transitorias como las derivadas de procesos naturales y antrópicos, pueden ocasionar durante cierto tiempo, un alto grado de degradación de la calidad del agua de origen y una gran disminución de la eficiencia en los procesos para el tratamiento de potabilización incurriendo a su vez en altos costos para su potabilización.

La forma más eficaz de garantizar sistemáticamente la seguridad de un sistema de abastecimiento de agua de consumo, es aplicando un plan integral de evaluación de los riesgos que abarque todas las etapas referentes de dicho sistema, desde la cuenca de captación hasta su distribución al consumidor. Tabla 3.16 y 3.17.

Tabla 3. 16. Plan de medidas para el control de la calidad de las aguas en el río Moa a escala de la cuenca.

Factores que influyen en la calidad de las aguas del río Moa	Acciones
Deforestación	Implementar prácticas conservacionistas como la reforestación de cuencas y recuperación de la vegetación típica del área.
Vías de comunicación	Crear vías de transporte de equipos mineros en zonas distantes a la cuenca del río y clausurar las que colindan con esta
Residuales de la Planta de Preparación de Pulpa	Chequear periódicamente que los sistemas de pozos y tuberías que conducen el agua reciclada del proceso de lavado de sus muestras, se encuentren en perfecto estado.

A nivel de la Planta Potabilizadora también se propone un conjunto de medidas para garantizar que la aguas que entran al proceso sean tratadas cumpliendo al máximo con las normas establecidas en cada etapa, incluyendo desde la captación hasta el suministro de agua potable en los tanques de almacenamiento de la planta. Tabla 3.17.

Tabla 3. 17. Plan de medidas para el control de la calidad de las aguas en el río Moa a escala de la Planta Potabilizadora.

Sistema de bombeo de agua cruda hacia la Planta Potabilizadora	Sistema de preparación y dosificación de reactivos	Sistema de tratamiento de agua
<p>Disponibilidad de equipamientos necesarios en la Estación de Bombeo, de forma que garantice la estabilidad en el suministro de agua cruda.</p> <p>Chequear periódicamente el estado técnico de los equipos utilizados para la captación del agua.</p>	<p>Lograr una adecuada preparación de los reactivos a usar en el proceso, realizando el pesaje real de la cantidad de cada uno.</p> <p>Llevar la constancia de las dosis empleadas en el libro de registro con firmas del tecnólogo principal, el jefe de laboratorio y el técnico que realiza el trabajo.</p> <p>Cumplir con las especificaciones del Sistema de Gestión de la Calidad y Sistema de Gestión Ambiental implementado en la empresa ECG.</p>	<p>Mantener una eficiente cloración en los distintos puntos de inspección para lograr la desinfección del agua, la oxidación de elementos metálicos y la materia orgánica presente en la misma y evitar una posible contaminación del agua potable durante el suministro a los distintos consumidores.</p> <p>Realizar una correcta operación de lavado de los filtros, dando cumplimiento al programa de limpieza de los mismos.</p>

3.9 Valoración económica de los trabajos realizados.

El costo de los análisis realizados en el laboratorio de la Planta Potabilizadora perteneciente a la Empresa Ernesto Che Guevara se muestra en la siguiente Tabla 3.18.

Tabla 3.18 El costo en CUP y CUC de los análisis realizados.

Parámetros	Precio de los análisis			Cantidad de muestras	Costo total		
	CUP	CUC	MT		CUP	CUC	MT
pH	4,16	2,29	6,45	1460	6073,60	3343,40	9417,00
STD	21,24	1,09	22,33	1460	31010,40	1591,40	32601,80
C.E	4,05	1,61	5,66	1460	5913,00	2350,60	8263,60
Turbidez	1,43	3,08	4,51	1460	2087,80	4496,80	6584,60
DOQ	22,41	13,43	35,84	1460	32718,60	19607,80	52326,40
Color	2,01	7,36	9,37	1460	2934,60	10745,60	13680,20
DBO5	21,28	20,37	41,65	1460	31068,80	29740,20	60809,00
MO	4,00	1,21	5,21	1460	5840,00	1766,60	7606,60
NO ₂ -	4,8	2,79	7,59	1460	7008,00	4073,40	11081,40
NO ₃ -	14,26	7,68	21,94	1460	20819,60	11212,80	32032,40
SO ₄ ²⁻	23,87	6,11	29,98	1460	34850,20	8920,60	43770,80
CO ₃ ²⁻ , HCO ₃ ⁻	18,32	3,23	21,55	1460	26747,20	4715,80	31463,00
Ni ²⁺ , Fe ²⁺ , Cr ⁶⁺ , Mg ²⁺ , SiO ₂ ²⁻ ,	35,48	8,99	44,47	1460	51800,80	13125,40	64926,20
Ca ²⁺	13,15	2,2	15,35	1460	19199,00	3212,00	22411,00
Cl ⁻	8,04	4,1	12,14	1460	11738,40	5986,00	17724,40
Coliformes termotolerantes y totales	20,64	17,7	38,34	1460	30134,40	25842,00	55976,40
Costo total de los análisis					319944,4	150730,4	470674,8

Tabla. 3.19 Costos de los trabajos realizados.

Actividad	Norma (Días)	Días trabajados	Precio CUP
Recopilación de la información	3,46	23	43,5
Programa de investigación	1,73	23	22,8
Recorrido de campo (rutas)	14,59	6	95,3
Trabajos de gabinete	11,54	40	215,5
Informe final	2,89	40	130,0
Costo total de los trabajos realizados			377,1

Tabla. 3.20 Costo total de la investigación.

Costo total de los análisis			Costo total de los trabajos realizados	Costo total de la investigación		
CUP	CUC	MT	CUP	CUP	CUC	MT
319944.40	150730.40	470674.80	377.10	320 321.50	150 730.40	471 051.90

El costo total de la investigación es de **320321.5 CUP**, en **CUC** es de **150730,40** y **471051,90** en Moneda Total.

CONCLUSIONES

1. La calidad de las aguas del río Moa se encuentra influenciada por factores naturales: las precipitaciones, la topografía, la litología, los procesos de erosión y la meteorización. Por su parte la actividad minera, las vías de comunicación, la deforestación y los residuales de la Planta de Preparación de Pulpa constituyen los factores antrópicos.
2. Según las normas cubanas NC: 93-11-2.1986, NC 1021: 2014, NC: 827: 2017 y la norma de la Organización Mundial de la Salud (OMS: 2006), algunas propiedades físico – químicas como el color, la turbidez, conductividad, los sólidos totales disueltos, el hierro, el níquel y bacteriológicas de las aguas del río Moa presentan valores por debajo y por encima de los límites máximos y mínimos admisibles. Las aguas se clasifican según Aliokin como aguas hidrocarbonatadas-magnésicas, según su dureza como aguas blandas, por su pH débilmente básicas y por su mineralización como aguas dulces.
3. Según los valores del ICA (Sup) obtenidos mediante la metodología de Montoya et al., (1997), las aguas superficiales se clasifican como aguas aceptables y poco contaminadas, por lo que requieren tratamiento convencional. Las destinadas al consumo humano, requieren una ligera purificación en los meses que las aguas son aceptables y una mayor necesidad de tratamiento las aguas pocos contaminadas. Para el proceso industrial, solo se requiere una ligera purificación para algunos procesos en el caso de las aguas aceptables y sin tratamiento para la industria normal para las aguas poco contaminadas.
4. El consumo de sulfato de aluminio y cloro gaseoso sobrepasan las normas establecidas en los meses de enero, mayo, octubre, noviembre y diciembre, el resto de los reactivos químicos cumplen con la dosis de consumo. Por concepto de sulfato de aluminio hubo un sobreconsumo 35.58 t, que representa un costo de 12 269.01 CUP y 13 373.22 CUC. En el caso del cloro líquido hubo un sobreconsumo de 1.60 t representando un costo de 983.59 CUP y 1072.11 CUC. El costo total ascendió a en 13 252.60 CUP y en 14 445.33 CUC.

5. Se propone un plan de medidas de control que garanticen la calidad de las aguas del río Moa, estableciéndose las mismas tanto a escala de la cuenca como a nivel de la Planta Potabilizadora.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda a los especialistas del laboratorio de las UBS Planta Potabilizadora de la Empresa ECG realizar las pruebas de Jarras en periodos de intensas precipitaciones para lograr la dosis exacta de consumo de reactivos químicos.
2. Aplicar el plan de medidas propuesto tanto a nivel de la cuenca como a escala de la planta potabilizadora.

BIBLIOGRAFÍA

ALDANA AGUILAR, M.L. y ZACARIAS LAYNES, EDISON, E., 2013. Determinación de los índices de calidad de agua del río Cucabaj y la influencia en los costos de tratamientos de potabilización.pp. 5.

ARIZAGA MONDRAGÓN, J.A., 2016. Evaluación de la planta de tratamiento de agua potable de la ciudad de Vincés. Universidad de Guayaquil, Facultad de Ingeniería Química.

BARAJAS GARZÓN, C.L., LEÓN LUQUE, A.J. y OTHERS, 2015. Determinación de la dosis óptima de sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$) en el proceso de coagulación – floculación para el tratamiento de agua potable por medio del uso de una red neuronal artificial.

BETANCOURT, C., SUÁREZ, R. y JORGE, F., 2012. Influencia de los procesos naturales y antrópicos sobre la calidad del agua en cuatro embalses cubanos. *limnetica*, vol. 31, no. 2, pp. 193-204.

CARRILLO CASTRO, A.G. y VILLALOBOS ALCÁZAR, R., 2010. Análisis comparativo de los Índices de Calidad del Agua (ICA) de los Ríos Tecolutla y Cazones en el período marzo- diciembre 2010. Universidad Veracruzana.

CASILLA QUISPE, S., 2014. Evaluación de la calidad de agua en los diferentes puntos de descarga de la cuenca del río Suhez. Universidad Nacional del Altiplano.

CASTRILLÓN BEDOÑA, D. y GIRALDO, M. de los Á., 2012. Determinación de las dosis óptimas del coagulante sulfato de aluminio granulado tipo b en función de la turbiedad y el color para la potabilización del agua en la planta de tratamiento de Villa Santana. Disponible desde: <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/11059/31>, vol. 46, no. 1, pp. 628162.

CRESCO LAMBERT, M., 2018. Evaluación de la calidad de las aguas de abastecimiento del poblado Yamanigüey. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.

CRUZ RAMÍREZ, Y., 2019. Evaluación de las arcillas caoliníticas del depósito Cayo Guam para la producción de cemento de bajo carbono. Universidad de Moa.

DE MIGUEL FERNÁNDEZ, 2012. Hidrogeología aplicada con aspectos ambientales. Editorial Digital Universitaria de Moa.

DIGNORACH SUÁREZ MALCOLM, E. y LIMA PIMIENTA, A.B., 2015. Investigación Hidrogeológica para la captación de agua para el riego del campo de golf los Flamencos, Cayo Coco. XI Congreso Cubano de Geología.Taller sobre Aguas Subterráneas y Contaminación., pp. 1-5.

DUMAGUALA, N., SOLEDAD, T., REINOZO, R. y MARIBEL, J., 2014. Análisis del costo de producción de agua potable y el índice de pérdidas por agua no contabilizada, en las plantas de producción Tomebamba y Machángara de la Empresa Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca ETA. Politécnica Salesiana.

FERNÁNDEZ-MIGUEL, C. y VÁZQUEZ-TASET, Y., 2006. Origen de los nitratos y nitritos, su influencia en la potabilidad de aguas subterráneas. Minería y Geología, vol. 22, no. 3, pp. 1-9.

FERNÁNDEZ FIS, Y.Y., 2007. Riesgos ambientales por contaminación en las aguas superficiales del río Moa. Instituto Superior Minero Metalurgico de Moa.

FERNÁNDEZ PARADA, N. J., & SOLANO ORTEGA, F. (2013). Índices de calidad (ICAS) y de contaminación (ICOS) del agua de importancia mundial. Conferencia Internacional Usos Múltiples Del Agua: Para La Vida Y El Desarrollo Sostenible, (III), 116.

FERNÁNDEZ RODRÍGUEZ, M., 2003. Evaluación de la calidad de las aguas de consumo humano en la zona urbana de la ciudad de Moa. Instituto Superior Minero Metalurgico de Moa.

FERNÁNDEZ RODRÍGUEZ, M., 2007. Evaluación de la calidad físico- química y bacteriológica del agua subterránea en pozos criollos del municipio de Moa. Water,

vol. 23, no. 4, pp. 11.

FERNÁNDEZ RODRÍGUEZ, M., *et al*, 2019. Evaluación de los índices de calidad del agua del río Moa y su influencia en el proceso de potabilización. VIII Congreso de Ciencias de la Tierra, XIII Congreso de Geología. Memorias del Congreso.

FERNÁNDEZ RODRÍGUEZ, M., DÍAZ BISSET, E. y LAURENCIO RICARDO, N., 2007. Eficacia del proceso de potabilización de las aguas superficiales en la planta de tratamiento de la Empresa Ernesto Che Guevara.

GONZÁLEZ CABRERA, N.A., PELÁEZ GARCÍA, R. y SOBRINO HERNÁNDEZ, E., 2013. Características geológicas, hidrogeológicas y ambientales del sistema acuífero carbonatado sur en el Occidente de Cuba: sector los Palacios- Candelaria. X Congreso Cubano de Geología (GEOLOGIA'2013) Hidrogeología e Ingeniería Geológica, pp. 17.

IDROVO, C., 2010. Optimización de la planta de tratamiento de Uchupucun.

LAURENCIO RICARDO, N., 2005. Eficacia del proceso de potabilización de las aguas superficiales en la Planta de Tratamiento de la Empresa Ernesto Che Guevara. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.

LLONTOP, H.C., 2010. Calidad del agua en la cuenca del Río Rímac-Sector de San Mateo, afectado por las actividades mineras. UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS.

LÓPEZ, E.P., 2016. Control de calidad en aguas para consumo humano en la región occidental de Costa Rica. Tecnología en Marcha, vol. 29, no. 3, pp. 3-14.

LOZADA, P.T., VÉLEZ, C.H.C. y PATIÑO, P., 2009. Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano. Una revisión crítica. Revista de Ingenierías: Universidad de Medellín, vol. 8, no. 15, pp. 3.

MARTÍNEZ, A.D., 2006. Métodos de análisis físicos y espectrofométricos para el análisis de aguas residuales. Tecnología en Marcha, vol. 19, no. 2, pp. 31-40.

MEZA-LEONES, M., RIAÑOS-DONADO, K., MERCADO-MARTÍNEZ, I., OLIVERO-VERBEL, R. y JURADO-ERASO, M., 2018. Evaluación del poder coagulante del sulfato de aluminio y las semillas de Moringa oleífera en el proceso de clarificación del agua de la ciénaga de Malambo-Atlántico. *Revista UIS Ingenierías*, vol. 17, no. 2, pp. 95-104.

MIRAVET SÁNCHEZ, B.L., GARCÍA RIVERO, A.E., LÓPEZ DEL CASTILLO, P., ALAYÓN GARCÍA, G. y SALINAS CHÁVEZ, E., 2016. Calidad de las aguas del río Ariguanabo según índices físico-químicos y bioindicadores. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, vol. 37, no. 2, pp. 108-122. ISSN 16800338.

MORGAN, P., 2005. Soil erosion and conservation. National Soil Resources Institute. Crainfield University, vol. 125.

NORMA CUBANA, 2014. NC 1021: 2014 Higiene comunal — fuentes de abastecimiento de agua — calidad y protección sanitaria, (261), 830–835.

NORMA CUBANA, 2017. NC 827: 2017 Agua potable — Requisitos sanitarios. No. 261, pp. 830-835.

OMS. (2006). Guías para la calidad del agua potable. *Atención Primaria*, 1, 7. [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(00\)00006-6](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(00)00006-6)

ORTIZ-ROMERO, L.T., 2015. Determinación de metales pesados e índices de calidad en aguas y sedimentos del río Magdalena-tramo Tolima, Colombia. *Revista Tumbaga*, vol. 2, no. 10.

PEÑAFIEL ROMERO, A.G., 2014. Evaluación de la calidad del agua del río Tomebamba mediante el índice ICA del Instituto Mexicano de tecnología del agua.

PÉREZ CASTILLO, A.G. y RODRÍGUEZ, A., 2008. Índice físico químico de la calidad de agua para el manejo de lagunas tropicales de inundación. 2008.

PÉREZ OSORIO, G., ARRIOLA MORALES, J., GARCÍA LUCERO, T., SALDAÑA BALANCO, M.L. y MENDOZA HERNÁNDEZ, J.C., 2016. Evaluación de la calidad del agua de Cuatro Jagüeyes del Parque Estatal “Flor del bosque”, Puebla, México. *Ra*

Ximhai, vol. 12, no. 1665-0441, pp. 17.

POLANCO ALMAGUER, P., 2012. Influencia de los procesos geológicos en la morfología costera del municipio Moa. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.

PUEBLA TAMAYO, Y., 2009. Evaluación de la Materia Orgánica y el Cloro Residual en las aguas de consumo humano de la ciudad de Moa en el Periodo febrero -Abril de 2009. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.

QUIROZ FERNÁNDEZ, L.S., IZQUIERDO KULICH, E. y MENÉNDEZ GUTIÉRREZ, C., 2017. Aplicación del índice de calidad de agua en el río Portoviejo, Ecuador. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, vol. 38, no. 3, pp. 41-51.

ROBERT PULLÉS, M., 2014. Microorganismos indicadores de la calidad del agua potable en Cuba. Revista CENIC. Ciencias Biológicas, vol. 45, no. 1.

RODRÍGUEZ INFANTE, A., 1998. Estudio morfotectónico de Moa y áreas adyacentes para la evaluación de riesgos de génesis tectónica. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Geológicas.

RODRÍGUEZ INFANTE, A., 2007. Morfoalineamientos en la zona costera entre el poblado de Yamanigüey y la ciudad de Baracoa. Minería y Geología, vol. v.23 n.3, no. 1993 8012, pp. 17.

RUBIO CABALLERO, D. de la C., 2017. Evaluación de la calidad de las aguas en el poblado La Melba. Instituto Superior Minero Metalúrgica de Moa.

SAMBONI RUIZ, N.E., CARVAJAL ESCOBAR, Y. y ESCOBAR, J.C., 2007. Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua. Ingeniería e Investigación, vol.27, no.3, pp.172-181.

Sibiya, S.M. "Evaluation of the streaming current detector (SCD) for coagulation control."; 2014. 1211-1220 p.

SUCOSHAÑAY VILLALBA, D.J., GUTIÉRREZ HERNÁNDEZ, J.E., GARCÍA RIVERO, A.E., LEDESMA ACOSTA, R. y MIRA VÁSQUEZ, J.M., 2015. Evaluación de la calidad

de las aguas superficiales de la cuenca del río Puyo de la amazonia ecuatoriana a partir de un índice integrador (ICA_sp). Ciencias de la Tierra y el Espacio, vol. 16, no. 1729-3790, pp. 225-236.

TORRES, S.M.E. y DE NAVIA, S.L.A., 2010. Calidad físico-química y microbiológica del agua del municipio de Bojacá, Cundinamarca. Nova, vol. 8, no. 14.

TORRES VEGA, F.J., 2009. Desarrollo y Aplicación de un Índice de Calidad de Agua para ríos en Puerto Rico. S.l.: Universidad de Puerto Rico Recinto Universitario de Mayagüez.

VALCÁRCEL ROJAS, L., PORTELA BORROTO, J., ALBERRO MACÍAS, N., GRIFFITH MARTÍNEZ, J., DERIVET ZARZABAL, M., FLORES JUAN, P., CUESTA BORGES, J., RODRÍGUEZ GONZÁLEZ, M., HERRERO, Z., RODRÍGUEZ GARCEZ, A. y DOMÍNGUEZ CATASUS, J., 2010. Modelación de la calidad del agua en el segmento medio del río Luyanó. 2010.

VILTRES MILÁN, Y., 2011. Evaluación de riesgos por deslizamiento en taludes y laderas del sector este del municipio Moa. S.l.: Instituto Superior Minero Metalurgico de Moa.