

Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas

Facultad de Construcciones

Departamento de Ingeniería Hidráulica



TRABAJO DE DIPLOMA

EVALUACIÓN DEL CAUDAL MÍNIMO ECOLÓGICO DEL RÍO SAGUA LA CHICA.

Autor: Oslandy Naranjo Gattorno

Tutor: Msc.Ing. István Gómez Ríos

Santa Clara

Curso 2017

"Año de la Revolución."

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis padres ,hermana y familiares por su empeño y dedicación con mi preparación.

A mi tutor por su tiempo valioso.

A mis amigos y compañeros de estudio por su ayuda desinteresada .

Agradecimientos

A mis padres, hermana y al resto de la familia por darme la confianza de creer en mí.

Al MSc.Ing. István Gómez Ríos por el apoyo y dirección brindada, por compartir su conocimiento y experiencia para la realización de este trabajo.

A mis amigos y compañeros que estuvieron a mi lado en todo momento.

A mis profesores que me han apoyado para llegar hasta aquí.

Al INRH por aportarme los datos necesario para la realización de este trabajo.

RESUMEN

(Alcaide, 1973).plantea que la idea de mantener unos caudales mínimos en los ríos no resulta absolutamente nueva. En el siglo XIX, por ejemplo, se llegó a fijar por tramos la anchura normal de las aguas medias de los ríos del norte de Alemania.

En Cuba se emplea una resolución 24/ 99 del INRH que norma el aporte de caudales diarios.

En el caso del Río Sagua la Chica, espacio natural de extraordinario interés ecológico nacional, el "caudal ecológico mínimo " previsto en Res 24 /99 del INRH(Hidráulicos, 1999) de las presas involucradas en el aporte hídrico al Río Sagua la Chica es de 1527 l/s y el cálculo del caudal ecológico mínimo es de 1420 l/s.

Se realizaron los cálculos obteniendo valores de caudales medios anuales de 3393.87 m³/s con un caudal medio de corrientes ordinarias de 2388.71 m³/s, lo que demuestra que el valor del caudal aportado según resolución se debe incrementar para el mantenimiento de la biótica de la región.

Abstract

THEY SUM UP

Jailer, 1973) the .planted that dreams her up to maintain some minimal flow intensities at rivers does not prove to be absolutely new. In the century XIX, for example, arrived himself to fix for stretches the normal width of half waters of the rivers of the north of Germany.

In Cuba a resolución²⁴ uses 99 of the INRH itself than standard the contribution of daily flow intensities.

In the event of the Río Sagua the Girl, natural space of extraordinary ecological national interest, the ecological minimal flow intensity foreseen in Rest the INRH's 24 /99Hydraulic, 1999) the Girl comes from 1527 of preys implicated in the hydric contribution to the Río Sagua l s and the calculation of ecological minimal flow intensity comes from 1420 l/s.

Came true calculations getting from moral values half yearly flow intensities of 3393,87 m³/s with a half flow intensity of ordinary currents of 2388,71 m³/s, what he demonstrates that the value of flow intensity contributed according to resolution must increment itself for the maintenance of the biotic one belonging to the region.

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	iv
Abstract.....	v
TABLA DE CONTENIDOS.....	vi
Introducción.....	9
Capítulo I Estado del arte para la determinación del caudal ecológico en ríos.....	12
1.1. Introducción.....	12
1.2. CONCEPTO DE CAUDAL ECOLÓGICO Y CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL CASO DE ESTUDIO.....	14
1.2.1 Cuenca del Rio Sagua la Chica.....	14
1.2.2 Datos de las obras construidas en la cuenca.....	16
1.3. MÉTODOS PARA EL CÁLCULO DEL CAUDAL ECOLÓGICO, VENTAJAS Y DESVENTAJAS.....	25
1.3.1 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS DIFERENTES ENFOQUES DE CÁLCULO DEL CAUDAL ECOLÓGICO.....	27
1.4. Otros aspectos a considerar.....	31
MASAS DE AGUA TIPO RÍO.....	31
1.5. CLASIFICACIÓN DE LOS RÍOS.....	32
1.6. RÉGIMEN DE CAUDALES DURANTE SEQUÍAS PROLONGADAS.....	36
1.6.1 DISTRIBUCIÓN TEMPORAL DE CAUDALES MÍNIMOS.....	37

1.7. APROXIMACIÓN HIDROLÓGICA.....	37
1.8.Conclusiones del capítuloI.....	39
CAPÍTULO II PROCEDIMIENTOS GENERALES PARA EL CÁLCULO DEL CAUDAL ECOLÓGICO.....	40
2.1. Cálculo de caudales medios.....	41
2.1.1Caracterización morfométrica de cuencas.....	42
2.1.2CÁLCULO DEL CAUDAL GENERADOR.....	47
2.2.Determinación de una curva de duración de caudales en una cuenca hidrográfica en caso de inexistencia de datos de caudal.....	50
2.3.Conclusiones del capítuloII.....	50
Capítulo III Análisis de los resultados.....	51
3.1 Análisis del gasto comprendido en el periodo.....	51
3.2 Resultados de los Cálculos.....	54
3.2.1Índice de compacidad o índice de Gravelius.....	54
3.2.2Factor de forma.....	54
3.2.3Índice de alargamiento.....	54
3.2.4Índice asimétrico.....	54
3.2.5Pendiente media de la cuenca.....	54
3.2.6Coeficiente orográfico.....	54
3.2.7Densidad de drenaje.....	54
3.2.8Constante de estabilidad del río.....	55
3.2.9Pendiente media del cauce.....	55
3.2.10Caudal medio de la cuenca.....	55
3.2.11Calculo del caudal ecológico.....	57
3.3 Conclusiones del capítuloIII.....	58

Conclusiones Finales.....	59
Recomendaciones.....	61
Referencias Bibliográficas.....	62
Anexo 1 MARCO CONCEPTUAL.....	63

Introducción

El alza en la demanda para tratar de satisfacer las necesidades de agua para las poblaciones, y la agricultura ha llevado a que los sistemas acuáticos estén deprimiéndose y sufran de alteraciones de diversos tipos afectando los regímenes naturales de vida eco sistémica. Estos sistemas acuáticos se encuentran amenazados debido a degradación del hábitat, así como, la sobreexplotación y contaminación química, entre otras.

Las corrientes superficiales han constituido para el ser humano la fuente de suministro de agua y de evacuación de los desechos productos de las actividades cotidianas de su quehacer. La problemática ambiental que se tiene en torno el agua, generalmente es debido a que este recurso, así como los ecosistemas tanto acuáticos y terrestres asociados al mismo, han sido explotados para satisfacer las necesidades del humano y no se ha tomado en cuenta su conservación para las generaciones futuras.

Sumado a las pocas acciones para la conservación de los recursos hídricos, y debido a planes económicos ambiciosos ha aumentado la demanda de agua para cubrir estas necesidades aparejadas al incremento poblacional.

Esto ha provocado una problemática muy compleja entre el uso y la explotación de ríos así como su conservación como un sistema ecológicamente estable e importante y dinámico.

Esto ha originado un conflicto político y ambiental ya que se relacionan las necesidades de extracción de agua por los humanos junto a la conservación del medio biológico generado en los ecosistemas que están presentes en los ambientes acuáticos.

El agua es el recurso de mayor importancia ya que se puede estar sin comer por un periodo de una semana pero sin beber agua solo un aproximado de tres días.

De ahí la importancia del manejo correcto y de la conservación o preservación del recurso agua y de todo el entorno que se relaciona con el.

Nuestro país ha llevado a cabo medidas de impronta para el cuidado y conservación de los ecosistemas relacionados a los ríos una de estas medidas es

la creación de los lineamientos de la política económica y social del Partido y la Revolución,(Cuba, 2016) que en su acápite 98,103 y 104 los que están en concordancia con la capacitación , regulación y control del personal y los organismos en el cuidado y conservación del medio ambiente.

Tomando en cuenta lo anterior y debido al incremento de las infraestructurashidráulicas, se ha determinado la necesidad imperiosa de conservar un nivel de agua en los sistemas acuáticos superficiales para mantener las funciones de los mismos, de los sistemas subterráneos y los ecosistemas terrestres asociados.

El caudal ambiental se sugiere como una alternativa de establecer el equilibrio entre las necesidades del ecosistema y las del hombre enmarcado en el ámbito social donde no se puede perder la idea de que conservar es la única alternativa de mantener la biodiversidad en los sistemas de agua dulce y por lo tanto , se debe establecer un régimen de caudales naturales, que permiten la vida en general de todos aquellos que se relacionan entre sí y con el ecosistema.

Para la evaluación de los caudales ecológicos se han desarrollado una serie de metodologías importantes, entre las cuales se encuentra los métodos hidrológicos basados en registros históricos enmarcados y recogidos en estaciones hidrométricas.

Estos métodos, que si bien solo nos da una visión amplia de la implementación de régimen de caudales ecológico, es fácil y rápido de aplicar y puede ser utilizado en las fases tempranas del manejo integral de cuencas además de presentar una base para el uso sustentable del recurso agua.

La evaluación de un caudal ecológico permitirá a los directores y gestores de agua, conocer la cantidad de agua que debe circular y existir en los ríos para garantizar el abastecimiento de las poblaciones la agricultura , la industria y la conservación de los ecosistemas

Para dar respuesta a lo anterior se expone el siguiente Problema científico de este trabajo.

Problema científico:

La no existencia de una normativa actualizada en cuanto al establecimiento de los caudales ecológicos permite el deterioro de la biótica y la fauna de los ríos ya que no se sabe la consideración previa en cuanto al periodo de análisis y establecimiento de los caudales ecológicos, así como la pérdida de compensación de las aguas en los litorales, permitiendo la intrusión salina de las costas hacia el interior de la tierra.

Hipótesis

Si se logra establecer los límites mínimos del caudal ecológico necesario aguas abajo del Río Sagua la Chica, entonces se podrá establecer los nuevos caudales mínimos para el desarrollo normal de biótica y la fauna del río.

Objetivo general

Evaluar los límites mínimos necesarios del caudal ecológico del Río Sagua la Chica. Y comparar con los valores establecidos en la resolución 24/99 del Recursos hidráulicos con respecto al establecimiento en cuba de los caudales ecológicos

Objetivos específicos

- Realizar una revisión bibliográfica sobre temas afines al cálculo del caudal ecológico en ríos.
- Determinar los valores de caudal ecológico en ríos sobre la base de las tendencias actuales y las condiciones de nuestro país. .
- Aplicar la propuesta de procedimiento para el cálculo ecológico al caso de estudio: Río Sagua la Chica
- Realizar un análisis de los resultados obtenidos para el caso de estudio.

Capítulo I Estado del arte para la determinación del caudal ecológico en ríos.

1.1. Introducción

En este capítulo se realizará una revisión bibliográfica del tema de estudio el cual está encaminado a evaluar el caudal mínimo ecológico del Río Sagua la Chica de la provincia de Villa Clara.

Donde se partirá definiendo algunos conceptos básicos de caudal ecológico y de la importancia del mismos para la conservación de la flora y la fauna de una cuenca y de un territorio en general.

El (MINISTERIO DE CIENCIA, Septiembre del 2015).(CITMA) y su Agencia de Medio Ambiente (AMA) tiene una prioridad enmarcada en el Lineamiento 133 que plantea “Enfatizar en la Conservación y uso racional de los recursos naturales como los suelos, el agua, las playas, la atmósfera, los bosques y la biodiversidad”

El establecimiento de los caudales ecológicos o (gastos sanitarios), tiene una alta importancia marcada para el desarrollo normal de la biótica y la flora así como en el sostenimiento de las labores de desarrollo social e industrial en el ser humano.

Desde el año 1999 no se establecen en Cuba los gastos sanitarios(Hidráulicos, 1999), los que fueron establecidos por la Resolución 24/99 (Hidráulicos, 1999), y solo están establecidos para los gastos que deben aportar las presas para el mantenimiento de los caudales aguas abajo, a lo que se hace necesario revisar los cálculos y ordenar los mismos en favor del caudal que debe circular en el río para mantener la biótica y la explotación del hombre. A continuación se referencian los gastos de la provincia de Villa Clara según la propia resolución.

Provincia: Villa Clara

Presas	l/s
Gramal	4
Las Mercedes	4
Agabama	4
Manicaragua	37
C-39	10
Arroyo Grande	292
Santa Clara	65
Palma Sola	100
Palamarito	80
La Quinta	50
Minerva	177
Alacranes	1300

En esta resolución no se aportan datos ni cálculos por los que fueron establecidos los caudales solo se emite el cuerpo legal normándolos y tampoco se realiza o expresa el método por el cual fueron establecidos estos límites de caudal.

1.2. CONCEPTO DE CAUDAL ECOLÓGICO Y CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL CASO DE ESTUDIO.

Según (MARTÍNEZ, 2013, el concepto de caudal ecológico o caudal ambiental (Qe) ha sido tratado por diferentes organizaciones, autores y estudiosos del tema, y existen varias versiones por lo que se considera necesario buscar claridad y unificación de su significado, base técnica conceptual a ser utilizada en este trabajo. Las diferentes definiciones tienen en común las siguientes características:

Caudal mínimo requerido para el normal funcionamiento de un ecosistema acuático – Cantidad

- Caudal que garantiza una calidad específica del recurso hídrico para el normal desarrollo del ecosistema acuático así como para su uso en actividades de índole socioeconómica – Calidad
- Caudal que no es estático sino que por el contrario debe ser dinámico respecto a la variación del régimen hídrico – Variabilidad temporal y espacial.
- Herramienta de planeación para el aprovechamiento del recursos hídrico – Herramienta de planificación.

De acuerdo a lo planteado por ((WWF), Octubre de 2011, MARTÍNEZ, 2013 , Bernis, 2009)De acuerdo con lo planteado por la WorldWildlifeFund, por sus siglas en inglés(WWF) o Fondo Mundial para la Naturaleza, ***el caudal ecológico es un instrumento de gestión que establece la calidad, cantidad y régimen del flujo de agua requerido para mantener los componentes, funciones, procesos y la resiliencia de los ecosistemas acuáticos que propician bienes y servicios a la sociedad***

Antes de comenzar con la resolución del problema se debe establecer las características principales del río y su cuenca en cuestión, ya que nos permitirá conocer toda la tipología de la cuenca, la biótica y el terreno.

1.2.1 Cuenca del Rio Sagua la Chica

La figura a continuación muestra la cuenca de estudio y los embalses contenidos los que tributan o aportan al caudal que debe tener el río Sagua la Grande.

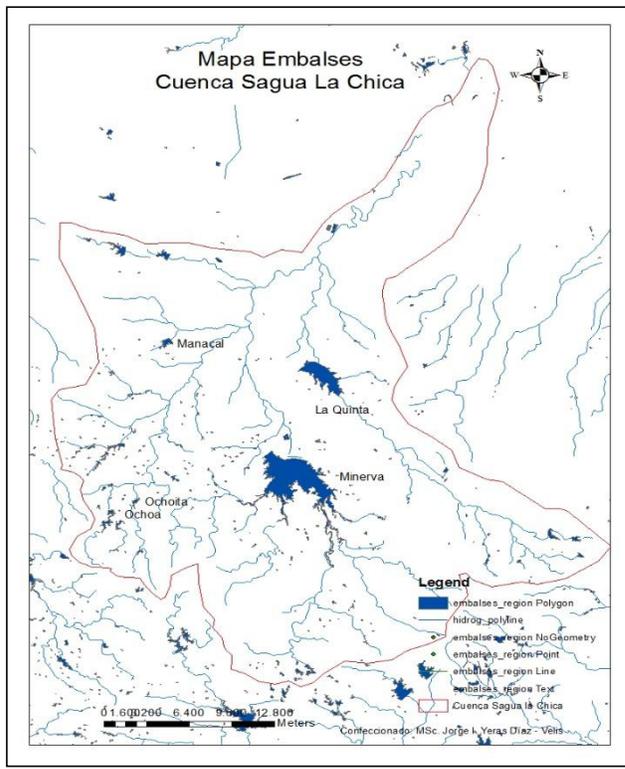


Figura: 1 Cuenca Sagua la Chica (Velis., 2014)

Fisiográficas

Las cuencas tienen una fisiografía muy diversa por lo que se debe siempre conocer los datos más importantes, según datos aportados por Recursos Hidráulicos Villa Clara (Hidráulicos, 2017a). el área total de la cuenca es de unos 1055 km². Sus límites geográficos son por el oeste la cuenca del río Sagua la Grande, por el sur las cuencas de los ríos Agabama y Zaza, por el este las de los ríos Manacas, Grimoso y Jinaguayabo, mientras que por el norte desemboca a la Bahía de Buenavista, a unos 5 km del poblado El Santo

En su parte alta la cuenca presenta pendientes algo abruptas y lomeríos ondulados que a media que el relieve va descendiendo hacia la costa se van haciendo más suaves. En el resto del territorio de ella se observan lomeríos de menor altura, entre los cuales transcurren valles con taludes bien definidos que sirven de drenaje natural a la misma (Hidráulicos, 2017a).

Las condiciones naturales de la cuenca se encuentran bastante alteradas por la mano del hombre. Sobre su territorio se han construido algunas obras hidráulicas entre las que sobresalen las presas Minerva (1969), La Quinta (1996), las Derivadoras Pavón (1975) y Camajuani (1994). También sobre el afluente Ochoa fue iniciada la presa Ochoita aun sin concluir(Hidráulicos, 2017a).

La orientación de la cuenca es de sur a norte, encontrándose la misma diseccionada por la corriente principal que es el rio Sagua la Chica, con una longitud de 95.2 km, y sus dos afluentes principales que son Camajuani y Ochoa, así como otros de menor relevancia, entre los que se señalan Ayagan, Primero, Manajanabo, Jagüeyes, Piedra, La Campana y otros menos importantes(Hidráulicos, 2017a).

El nacimiento de los tres ríos de mayor significación tiene lugar en las cercanías de la altura 300, 250 y 200 msnm, correspondiéndose por su orden con Sagua la Chica, Ochoa y Camajuani.

A continuación, se expondrán los elementos de cada obra existente y posteriormente se realizará una breve descripción fisiográfica de cada uno de esos puntos como se puede apreciar en la tabla siguiente.

1.2.2 Datos de las obras construidas en la cuenca.

Estos datos muestran las obras construidas sobre la cuenca y refieren la data del uso para el que están destinados cada uno de estos embalses

Tabla1: Obras construidas en la cuenca.(Hidráulicos, 2017a)

Nombre de la obra.	Coordenadas		Fechas de:		Destino	Uso Actual
	N	E	Estudio	Construcción		
Presa Minerva	290.900	624.100	1967	1969	Riego	Riego y Abasto
Presa La Quinta	298.230	625.700	1983	1996	Riego	Riego
Derivadora Pavón	307.500	625.500	1973	1975	Derivación para Riego	Derivación para Riego

Derivadora Camajuani	306.200	626.000	1983	1989	Derivación para Riego	Derivación para Riego
Presa Ochoita	286.300	612.200			Abasto	

Presa Minerva.

Según (Hidráulicos, 2017a). La subcuenca del río Sagua la Chica hasta el cierre de la presa Minerva tiene orientación sur-norte, ubicándose esta en la parte centro-este de la actual provincia Villa Clara, limitando por el norte con la carretera que va de Santa Clara a Caibarién, por el oeste con la cuenca del río Sagua la Grande, por el sur con las de los ríos Agabama y Zaza y por el este con las de los ríos Manacas, Grimoso y Jinaguayabo. Su relieve en la parte alta de la subcuenca presenta pendientes abruptas y lomeríos ondulados. A medida que se va perfilando hacia el norte los lomeríos van suavizándose hasta llegar a tener pequeñas alturas. La formación del río ocurre a causa de una serie de disecciones verticales cercanas al vial viejo que va de Santa Clara a Báez, zona en que se observan algunas elevaciones como Loma Pajarito, Loma Vista Hermosa, Loma Las Nueces, estribaciones de la Sierra Alta del Agabama y otras más (Hidráulicos, 2017a). De todas ellas emanan corrientes de agua intermitentes que se hacen ya permanentes en unos pequeños lomeríos cercanos a Oropesa. Las alturas de estos lomeríos oscilan entre las cotas topográficas 250 y 300 msnm

La vegetación en la subcuenca es bastante diversa, predominando las galerías de árboles y arbustos a lo largo de los cauces de ríos y arroyos, así como los sembrados de cañas, cultivos varios, frutos menores, palmas y árboles aislados, presentándose en raras ocasiones pequeños bosques.

La red hidrográfica de la subcuenca presenta desarrollo tanto en su parte alta como en la media. La parte baja tiene menos desarrollada su red.

La construcción de la obra data del periodo 1966-1969. Es del tipo homogénea, de arcilla, con una altura máxima de 37 m. La obra consta de cuatro elementos fundamentales que son el dique o cortina de la presa, el aliviadero, la toma de agua y una estación de bombeo que fue construida con posterioridad a la terminación

de los tres elementos primarios. La longitud del dique es de 1625 m, con un ancho en su corona de 6 m. El aliviadero es del tipo mexicano, con un ancho de 128 m que permite una evacuación de 1250 m³/s para un periodo de retorno de una vez en 200 años. La toma de agua es del tipo de torre con galería a presión que puede entregar 30 m³/s.(Hidráulicos, 2017a)

En la ejecución de esta presa se excavaron 487600 m³ de material, se utilizaron 50000 m³ de filtros, el enrocamiento es de 146300 m³ y fueron vertidos 19600 m³ de hormigón.

Presa La Quinta

La subcuenca del río Camajuani hasta el cierre La Quinta tiene orientación noroeste, limitando por el sureste con la cuenca del río Zaza, por el noreste con áreas de pequeñas cuencas como las de los ríos Manacas, La Batea, El Mamey y Jícaro, por el suroeste y noroeste con la propia cuenca del río Sagua la Chica.

El relieve de la subcuenca es ondulado, presentando algunas elevaciones entre las que se destacan las Lomas de Santa Fe en la divisoria con la subcuenca en su parte alta de río Sagua la Chica con elevaciones de hasta 250 msnm y otros lomeríos en la zona del central Juan Pedro Carbo Servía, que constituyen la cota máxima de la subcuenca con elevación de 286 msnm(Hidráulicos, 2017a).

Los suelos de la subcuenca son, en lo fundamental, de los tipos Santa Clara, fase recoso alomado y alomado recoso, La larga, fase medio profundo, Martí, fase superficial medio profunda y profunda arcillosa. Presentan velocidades de infiltración media que varían entre 0.09 y 0.6 mm/min en condiciones normales. También se observan parcelas de eluvio- diluvio arcilloso en zonas aledañas a los cauces del río principal y sus afluentes(Hidráulicos, 2017a).

El río Camajuani se forma de la unión de los arroyos San Andrés y Caturla con nacimientos respectivos en las cotas 170 y 220 msnm cercanos a los poblados Placetas y Zulueta.

La vegetación en la subcuenca es bastante diversa, predominando la galería de árboles y arbustos a lo largo de los cauces, así como los sembrados de caña, ya

que es una zona con varios centrales azucareros a su alrededor. También se observan cultivos varios, frutos menores, palmas arboles aislados con pequeños montes, generalmente en las zonas más altas(Hidráulicos, 2017a).

La red hidrográfica de la subcuenca se encuentra bastante bien desarrollada, con un coeficiente de 0.92 km/km² (kilómetros de cauces por kilómetros cuadrados de superficie)(Hidráulicos, 2017a).

El volumen total de almacenamiento es de 38.37 hm³ con un volumen útil de 36.87 hm³.

El objetivo y uso actual de la obra es riego.

Derivadora Pavón

La Derivadora Pavón se encuentra ubicada sobre el río Sagua la Chica, a unos 16 km (línea recta) aguas abajo del cierre de la presa Minerva, muy cerca de la desembocadura del afluente Camajuani a la corriente principal, a una distancia aproximada de 1.0 km de la carretera que va desde Encrucijada hasta San Antonio de las Vueltas(Hidráulicos, 2017a).

La subcuenca Ochoa-Minerva-Pavón tiene orientación norte noroeste y se ubica al centro este de la actual provincia Villa Clara. Las mayores alturas de esta subcuenca se encuentran cercanas al nacimiento del río Ochoa y oscilan alrededor de 200 msnm. Este precisamente es el río más largo de la misma, aunque no el más caudaloso(Hidráulicos, 2017a).

El relieve de la subcuenca del río Ochoa tiene un descenso gradual hasta su desembocadura al Sagua la Chica que tiene lugar aproximadamente a 2 km del poblado Vega Alta. El tramo del río Sagua la Chica entre el cierre de la presa Minerva y la Derivadora Pavón posee un relieve más estable, con algunas pequeñas elevaciones en su margen derecha que resultan ser el parte aguas entre este río y su afluente el río Camajuani en esta zona(Hidráulicos, 2017a).

Los suelos que mayormente ocurren en la subcuenca Ochoa-Minerva-Pavón son pardos con carbonatos en los subtipos típicos y gleysosos, así como los pardos sin carbonatos también en los subtipos típicos y gleysosos(Hidráulicos, 2017a).

La vegetación en esta subcuenca es diversa, predominando las galerías de árboles arbustos a lo largo de los cauces, así como tienen lugar algunos bloques cañeros, cultivos varios de viandas, frutales aislados de igual forma que las palmas y arboles diversos.

El volumen total de almacenamiento es 1.6 hm³. Su objetivo y uso actual es riego.

Derivadora Camajuani

La Derivadora Camajuani, construida sobre el rio de este propio nombre se encuentra ubicada a unos 8 km (línea recta) aguas debajo de la presa La Quinta, muy cerca de la desembocadura de este rio al Sagua la Chica.

La subcuenca del rio Camajuani tiene orientación noroeste y se ubica al centro este de actual territorial de la provincia Villa Clara.

Las mayores alturas del tramo hidrológico Derivadora Camajuani presa La Quinta-nacimiento del rio Piedras son las de Loma del Burro y Lomas de Sinaloa con alturas aproximadas a los 110 msnm(Hidráulicos, 2017a).

El rio piedras es el más largo de este tramo, aunque no el más caudaloso, ya que es prácticamente un arroyo intermitente hasta la zona El Purial, donde se hace permanente, aunque con muy bajo caudal(Hidráulicos, 2017a).

El relieve del tramo no es muy abrupto, observándose en el área algunas elevaciones que contrastan en el mismo.

Los suelos que más se observan en el tramo son pardos con carbonatos en el subtipo típicos y en menor escala los ferralíticos cuarcíticos. En las terrazas del rio y algunos afluentes ocurren los suelos aluviales con elevada fertilidad.

La vegetación es variada y muy densa en las galerías que firman los cauces del rio principal y afluentes. Tienen lugar bloques cañeros y además se observan sembrados de cultivos varios, fundamentalmente de viandas y algunos vegetales. En el área se encuentran diseminados árboles de diferentes tipos y palmas reales.

El volumen total de almacenamiento es 300 000 m³. Su objetivo y uso actual es riego.

Presa Ochoita

El río Ochoa pasa por el este de la ciudad de Santa Clara, corre de sur a norte desagando cerca de la ciudad de referencia, recibiendo aguas debajo de la presa Ochoita el aporte de su afluente principal por la margen izquierda que es el arroyo Las Palmas. La cuenca es pequeña de forma alargada, con relieve accidentado y semimontañoso, pendientes abruptas y valle estrecho. Cerca del 26 % de la cuenca está cubierta por arbustos y pequeños bosques, el resto del área fundamentalmente por yerbas y suelos con muy escaso aprovechamiento agrícola(Hidráulicos, 2017a).

En el estudio hidrológico realizado se dan algunos datos geológicos, fundamentalmente los relacionados con la aseveración sobre la existencia de serpentinas que afloran a la superficie en forma de grandes manchas.

La presa como tal se encuentra ubicada aproximadamente 5.0 km al este de la ciudad de Santa Clara, a unos 850 m de la intercepción del cauce del río Ochoa con la carretera central en el tramo que une a Santa Clara con Placetas. Por esta vía y entrando por un desvío asfaltado a la derecha (zona de talleres Centrales de la ECOING 25), cuya longitud es aproximadamente de 850 m, se llega hasta la base de la presa, por la margen izquierda de la corriente mencionada(Hidráulicos, 2017a).

El inicio de la construcción de esta obra data de 1961 y su objetivo era el abasto de agua a Santa Clara, lo que se lograría a través de una conductora de gravedad hasta la planta potabilizadora distante aguas debajo de la presa unos 350.0 m. Tenía prevista una toma de agua, desagüe de fondo y vertedor en el cuerpo de la misma. Se paralizó en 1965 cuando ya se tenía fundido 40 470 m³ de hormigón, faltando por fundir 27 730 m³ (se presentaron asentamientos de 10 cm en los bloques del 12 al 15 que determinaron la paralización de la obra).

El NAN previsto se encuentra en la cota 116.6 m y el NAM en la 119.6 m.

Características morfométricas de los respectivos cierres ubicados en la cuenca del río Sagua la Chica.

En la tabla a continuación se referencian un resumen de las principales características morfométricas de la cuenca(Hidráulicos, 2017a).

Tabla:1Resumen de las características morfométricas de los respectivos cierres ubicados en la cuenca del río Sagua la Chica y las afluencias bilaterales entre ellos(Hidráulicos, 2017a).

Río	Cierre	Área de cuenca (km ²)	Longitud del río (km)	Pendiente del río (%)	Pendiente de la cuenca (%)	Longitud de las laderas (m)	Altura media (m)
1	2	3	4	5	6	7	8
Sagua la Chica	Presa Minerva	313	32.5	4.20	66.0	554.0	147
Sagua la Chica	Derivadora Pavón afluencia con presa Minerva, Derivadora Camajuani y presa Ochoita	414	43.4	3.20	50.0	707.0	90.0
Camajuani	Presa La Quinta	181	35.8	3.60	61.0	605.0	127
Camaju	Derivadora	25.0	11.0	2.10	28.0	550.0	50.0

ani	Camajuani, afluencia con presa La Quinta						
Ochoa	Ochoita	19.0	11.3	10.3	154	-	189
Sagua la Chica	Desembocadura afluencia con Derivadoras Pavón y Camajuani	65.0	36.2	0.97	23.3	894	43.0
Sagua la Chica	Desembocadura en condiciones naturales	1017	95.2	0.90	51.2	969	99.0

En la tabla 1 del anexo 2 se exponen datos de los parámetros hidrológicos utilizados para la proyección de las obras en la que en ningún momento se tubo presente el análisis de los caudales ecológicos.

Entre la Derivadora Camajuani y la desembocadura de este río al Sagua la Chica hay un área de 24.0 km² que entra en la Derivadora Pavón (Hidráulicos, 2017a).

Los parámetros hidrológicos más significativos de los estudios por los que fueron proyectadas esas obras se exponen en las tablas y se presentan los modelos de distribución utilizados en los mismos se observan en la tabla 2.

En subsuelo de roca, las secciones transversales normales resultaban de la profundidad y de la anchura del cauce navegable, pero en los tramos de río

móviles formados por materiales sueltos, o bien cuando se intentaba variar la sección transversal para mejorar las condiciones del río, tenían que fijarse aquellos parámetros de modo que, además de la profundidad deseada, se obtuviera también la anchura exigible.(Hidráulicos, 2017a)

Posteriormente, se establece el principio de que parte del agua disponible se tiene que destinar a asegurar el mantenimiento de un cierto “caudal ecológico mínimo” en los ríos, que asegure la permanencia de la biota preexistente, sin deterioro ambiental.

Esto significa, por un lado, que las obras o infraestructuras de regulación y derivación de caudales tendrán que garantizar un caudal remanente en el río aguas abajo de las mismas, y por otro lado, que una parte de este remanente no tendrá otra utilización y constituirá por sí mismo una demanda de agua.

Este trabajo basa su realización en el establecimiento de los límites necesarios de caudal mínimo indispensable para minimizar el impacto provocado por la explotación del hombre , el mantenimiento de la biótica y la fauna así como limitar la intrusión salina a la cual está sometida toda la extensión y la desembocadura de este río.

Después de realizada el análisis fisiográfico de la cuenca se definirá los métodos más usados en los cálculos de caudales ecológicos y hay que decir que no existe una metodología concreta en este aspecto por eso se exponen los diferentes métodos.

1.3. MÉTODOS PARA EL CÁLCULO DEL CAUDAL ECOLÓGICO, VENTAJAS Y DESVENTAJAS

De acuerdo con alguna bibliografía(PÉREZ, 2010, MARTÍNEZ, 2013), para poder establecer el valor del Q_e existen 4 enfoques o métodos de cálculo aunque existen otros cálculos realizados por otras instituciones no reconocidas y de interés de sus propios gobiernos como son los realizados por la junta de Galicia en España:

- Hidrológico
- Valoración hidráulica
- Hidrobiológico
- Holístico

Se debe mencionar que existe un quinto método en el cual se agrupan las metodologías que consideran la calidad del agua y no exponiéndose, debido a que éstas son muy pocas y se encuentran en desarrollo.

Método.

Los métodos clasificados como hidrológicos permiten calcular el caudal ecológico a partir del tratamiento de series de registro hidrológico de las cuales se establecen porcentajes de caudal, se determinan índices, se opta por un caudal calificado o establecido previamente como normativo o se calcula a partir de recomendaciones ya establecidas; se recomienda que las series de registro no tengan extensiones inferiores a 20 años y en la medida de lo posible que sean superiores a esta cifra(PÉREZ, 2010).

Dentro de este método existen valoraciones de estimación de caudal según el código francés y el código de Montana, Método de Hoppe, Método del caudal medio base, Método de Northern Great Plains Resource Program (NGPRP, 1974) y otros más de E.U.A

Método.

Según (PÉREZ, 2010, MARTÍNEZ, 2013), los métodos de valoración hidráulica consideran la relación entre el caudal y las características físicas del cauce en el cual se desarrollan una serie de interacciones entre el medio biótico y abiótico

y que configuran el ecosistema existente. Dentro de las relaciones que se estudian entre el caudal y las características físicas del cauce se encuentran el perímetro mojado (P), la velocidad (V) y la profundidad de la lámina de agua (Y), el sustrato, la cobertura vegetal, entre otras. Los métodos de valoración hidráulica se basan en el estudio de una o más secciones transversales del cauce bajo estudio.

Dentro de este enfoque se estudian variables como

Perímetro mojado

Múltiples transeptos

Método de Idaho

Modelación de simulación hidráulica de White (1976)

Método.

(PÉREZ, 2010, MARTÍNEZ, 2013)Este método es también conocido como el método de simulación de hábitat o métodos con enfoque ecológico. Aunque dentro de estos métodos se pueden incluir métodos de cálculo como el del perímetro mojado y que fue previamente presentado.

Este método tiene enfoques de variables como las planteadas por The Instream Flow Incremental Methodology (IFIM)–US Fish and Wildlife Service, Método basado en la geomorfología, Modelo de biomasa de Wyoming entre otros

Método

Estos métodos desarrollados en Australia y Sudáfrica y que reciben también el nombre de métodos funcionales tienen dos enfoques:

- Aproximación “bottom-up”: diseñados para construir un régimen de caudal modificado mediante la adición de componentes de caudal a una línea base de caudal cero.

- Aproximación “top-down”: aborda la pregunta ¿Cuánto se puede modificar el régimen de caudal de un río antes de que los ecosistemas acuáticos cambien notablemente o se degraden seriamente?

Algunos de los métodos que se enmarcan dentro del enfoque holístico o funcional se exponen a continuación; el procedimiento de cálculo no se expone en tanto éste varía de uno a otro grupo de trabajo, se podría decir que es poco gustado por los profesionales involucrados en la determinación del caudal ecológico (MARTÍNEZ, 2013). Es importante señalar que este método se basa en las necesidades económicas

Y se toman los criterios atendiendo a grupos como:

- Evaluación por Grupo de Expertos (EPAM),
- Evaluación por Equipo Científico (SPAM-Australia).
- Aproximación holística.

Estos métodos cuentan con ventajas y desventajas sustanciales de la cual haremos una valoración en el subíndice a continuación.

1.3.1 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS DIFERENTES ENFOQUES DE CÁLCULO DEL CAUDAL ECOLÓGICO

A continuación se presentan las ventajas y desventajas de emplear los diferentes métodos de cálculo del caudal ecológico de acuerdo con la bibliografía consultada.

Tabla 3: Ventajas de los diferentes enfoques de cálculo

MÉTODOS	VENTAJAS
HIDROLÓGICO	<p>Mayor grado de versatilidad en los métodos de cálculo.</p> <p>Facilidad de cálculo.</p> <p>Económicos en su aplicación.</p> <p>Rápidos de emplear; tiempos de</p>

	<p>trabajo de aproximadamente medio mes.</p> <p>La información que se requiere para su cálculo en la mayoría de casos existe y es de fácil acceso; registros hidrológicos.</p> <p>Registran el comportamiento histórico de las corrientes.</p>
HIDRÁULICO	<p>Permite establecer nexos entre la hidráulica de una corriente (perímetro mojado, profundidad de lámina de agua, velocidad, sustrato, etc.) y el bienestar ecosistémico.</p> <p>Tiempos de trabajo relativamente cortos (2 a 4 meses).</p> <p>Son específicos al lugar de trabajo, a los transectos o secciones hidráulicas trabajadas</p>
HIDROBIOLÓGICO	<p>Permiten conocer la respuesta de una especie, normalmente piscícola, a la variación del caudal.</p> <p>Sirven como herramientas específicas de estudio para especies de flora y/o fauna.</p> <p>Interrelacionan las características hidráulicas y ecológicas de las corrientes bajo estudio.</p> <p>Permiten predecir las consecuencias</p>

	de los cambios físicos sobre las comunidades hidrobiológicas
HOLÍSTICO	<p>Estos métodos permiten incorporar los modelos de simulación hidrológicos, hidráulicos y/o de hábitat o hidrobiológicos, así como diferentes ramas del saber puestas a trabajar de manera interdisciplinar, lo cual implica un trabajo de mayor cobertura en la búsqueda de encontrar una condición óptima de los ecosistemas acuáticos que se estudian en función del caudal</p> <p>Es un método muy organizado</p>

Tabla 4: Desventajas de los diferentes enfoques de cálculo

METODOS	VENTAJAS
HIDROLÓGICO	<p>No tienen en cuenta el estudio de las características físicas y biológicas de las corrientes bajo estudio, ello implica que el Qe puede ser subvalorado o sobrevalorado de acuerdo con los requerimientos reales del ecosistema acuático; se asumen vínculos ecológicos.</p>

	<p>Proporcionan una estimación de caudales relativamente rápida, sin muchos recursos pero de baja resolución</p>
<p>HIDRÁULICO</p>	<p>Se asumen vínculos ecológicos que no se comprueban, caso contrario para las metodologías con enfoque hidrobiológico.</p> <p>Implica mayor inversión económica respecto a los métodos de enfoque hidrológico.</p> <p>Se asume que a través de variables como profundidad de la lámina de agua, perímetro mojado y velocidad, principalmente, se pueden determinar las condiciones óptimas para las especies del ecosistema acuático lo cual es sesgado.</p>
<p>HIDROBIOLÓGICO</p>	<p>Su especificada limita los resultados a las especies bajo estudio; no se pueden generalizar resultados y la selección de la especie de estudio es crítica.</p> <p>Emplearlos como herramienta de planeación y conservación, por ejemplo, implicaría realizar estudios extensos y recurrentes.</p> <p>El uso de curvas de preferencia de las especies objetivo puede ser un</p>

	problema puesto que en muchos países esta información no se encuentra disponible
HOLÍSTICO	<p>Requiere un trabajo interdisciplinar de varios profesionales y ramas del conocimiento lo cual implica:</p> <p>Tiempos prolongados de trabajo(12 a 36 meses).</p> <p>Costos muy elevados.</p> <p>Puede resultar poco operacional.</p> <p>Gran cantidad de información de todas las áreas del conocimiento involucradas para que los expertos en el tema hagan sus recomendaciones.</p>

1.4. Otros aspectos a considerar

MASAS DE AGUA TIPO RÍO.

El régimen de caudales ecológicos incluye los siguientes componentes:

- Caudales mínimos que deben ser superados con objeto de mantener la diversidad espacial del hábitat y su conectividad, asegurando los mecanismos de control del hábitat sobre las comunidades biológicas, de forma que se favorezca el mantenimiento de las comunidades autóctonas.
- Caudales máximos que no deben ser superados en la gestión ordinaria de las infraestructuras, con el fin de limitar los caudales circulantes y proteger así a las

especies autóctonas más vulnerables a estos caudales, especialmente en tramos fuertemente regulados.

- Distribución temporal de los anteriores caudales mínimos y máximos, con el objetivo de establecer una variabilidad temporal del régimen de caudales que sea compatible con los requerimientos de los diferentes estadios vitales de las principales especies de fauna y flora autóctonas presentes en la masa de agua.
- Tasa de cambio máxima aguas abajo de infraestructuras de regulación, con objeto de evitar los efectos negativos de una variación brusca de los caudales, como pueden ser el arrastre de organismos acuáticos durante la curva de ascenso y su aislamiento en la fase de descenso de los caudales. Asimismo, debe contribuir a mantener unas condiciones favorables a la regeneración de especies vegetales acuáticas y ribereñas.
- Caudales de crecida aguas abajo de infraestructuras de regulación, con objeto de controlar la presencia y abundancia de las diferentes especies,

mantener las condiciones físico-químicas del agua y del sedimento, mejorar

las condiciones y disponibilidad del hábitat a través de la dinámica geomorfológica y favorecer los procesos hidrológicos que controlan la conexión de las aguas de transición con el río, el mar y los acuíferos asociados.

1.5. CLASIFICACIÓN DE LOS RÍOS.

La clasificación de los ríos dada por (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, 1982) que se va a emplear es la utilizada en la “Guía técnica para la caracterización del régimen de caudales ecológicos”. Esta clasificación estará en función de la disponibilidad de datos, tal y como se muestra a continuación.

- Clasificación cuando se dispone de datos de caudal medio diario Para llevar a cabo esta clasificación, la guía propone realizar un análisis sobre una serie de caudales diarios representativa de al menos 20 años de duración. Sobre cada año hidrológico se debe contabilizar el n° de días que presentan un caudal inferior a 10 l/s y tomar el percentil correspondiente al 80% de toda la serie. En función del valor que adopte este percentil (n° de días con caudal inferior a 10 l/s), el río se clasificará de una forma u otra.

Para ríos permanentes, el valor de este percentil no debe ser mayor de 7. Si, por el contrario se superara este umbral, dicho río se clasificará como temporal. Según el criterio especificado en la guía, los ríos temporales se dividen en tres categorías:

- Río estacional, si el valor del percentil 80 se encuentra entre 7 y 100 días/año.
- Río intermitente, si este valor está comprendido entre 100 y 300 días/año.
- Río efímero, el percentil 80 es superior a 300 días/año.

También según (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, 1982, (WWF), Octubre de 2011) Clasificación cuando se dispone de datos de caudal medio mensual Para llevar a cabo la clasificación se debe elaborar previamente una serie con el número de meses por año hidrológico cuyo caudal diario medio es inferior a 10 l/s. A partir de esta serie se calcula el percentil del 80%, y en función del valor obtenido se realizará la clasificación, según los valores umbrales que se muestran a continuación.

- Río permanente: Percentil 80 < 1
- Río estacional: 1 < Percentil 80 < 3
- Río intermitente: 3 < Percentil 80 < 9
- Río efímero: Percentil 80 > 9

El ríos Sagua la Chica, según estos criterios, y como se verá en el apartado de resultados, se determinan como Permanente. Para la caracterización del régimen de caudales ecológicos en ríos Permanentes (estacionales, intermitentes o

efímeros) se han aplicado los criterios metodológicos que se describen a continuación.

RÍOS ESTACIONALES

Se han utilizado por,(WWF), Octubre de 2011) en la medida de lo posible, los criterios definidos para la determinación de la distribución mensual de caudales mínimos y máximos en ríos permanentes. Sin embargo, tras los primeros análisis se ha detectado que no todos los métodos aplicados para ríos permanentes son utilizables en ríos no permanentes. Para estos casos se desarrollaron varias metodologías alternativas:

- Obtención de caudales ecológicos para cada mes, a partir de la curva de caudales clasificados específica de cada mes.
- Obtención de caudales ecológicos para todo el año mediante metodologías para ríos permanentes, previa exclusión del período de cese de caudal identificado.
- Identificar dos hidroperíodos y, tras excluir el período de cese, aplicar las metodologías para ríos permanentes en cada hidroperíodo.

Tal y como establece el IRH, y como necesidad para aplicar las metodologías descritas, para estos ríos no permanentes se ha realizado una caracterización del periodo de cese de caudal anual, atendiendo a la frecuencia, duración, estacionalidad y tasa de recesión de los episodios de cese de caudal característicos del régimen natural, utilizando para ello una serie hidrológica representativa de, al menos, 20 años. La caracterización del período de cese se ha realizado de la siguiente forma: - Agrupar los datos de caudal diario en años hidrológicos, contando el número de días al año con caudal nulo (se considera nulo cuando es inferior a 1 l/s).

- Determinar la frecuencia de los eventos de cese, contando para cada año el número de eventos y, a partir de la serie conformada de número de eventos al año, seleccionar entre el percentil 25 y 75.
- Determinar la duración del período de cese, seleccionando entre el percentil 0 y 25 de la serie de número de días al año con caudal nulo.
- Determinar la estacionalidad de los eventos, registrando el mes de ocurrencia de cada día con caudal nulo y determinando las frecuencias de ocurrencia para cada mes.

Asimismo, se ha determinado el período de cese hiperanual, analizando los meses en los que el caudal es nulo (inferior a 1 l/s) durante varios años consecutivos y estableciendo una propuesta en base a este análisis.

RÍOS INTERMITENTES Y EFÍMEROS.

En los ríos intermitentes y efímeros se han caracterizado los siguientes aspectos:

- Régimen de mínimos, aplicando en la medida de lo posible los métodos descritos para ríos temporales.
- Período de cese de caudal atendiendo a la frecuencia, duración, estacionalidad y tasa de recesión de los episodios de cese de caudal característicos del régimen natural, aplicando la metodología descrita para ríos temporales.
- Magnitud de la crecida y período de tiempo de recesión al caudal base, que permiten el desarrollo del ciclo biológico de las comunidades adaptadas, en aquellos casos en los que era procedente su determinación.
- Caudal generador que permite mantener la dimensión del canal principal del río y su buen funcionamiento morfodinámico, en los mismos términos que el punto anterior.

MASAS DE AGUA MUY ALTERADAS HIDROLÓGICAMENTE.

Por la especial selección de los tramos a analizar y de acuerdo a (Bernis, 2009), gran parte de las masas a estudio se sitúan aguas abajo de embalses. Por ello, en la mayoría de ellos existe una variación en el régimen de caudales circulantes por lo que se han definido como muy modificadas por alteración hidrológica según el criterio utilizado y descrito en el correspondiente Anejo. En estas masas de agua, según la IPH, existe una mayor amplitud a la hora de definir el régimen de caudales mínimos en el río, de modo que en el método de modelación por hábitat, que se verá en los siguientes apartados, permite estimar un régimen de caudales menor al que habría si la masa no fuera muy modificada por alteración hidrológica. No obstante, hay que recordar que en una parte importante de estas masas de agua el régimen de caudales mínimos se cumplirá sin problemas en los meses de verano (en principio los más conflictivos) ya que muchas de ellas el caudal en esta época es superior debido a que se utiliza para transportar el recurso para el abastecimiento de diferentes demandas (mayoritariamente agrícolas).

1.6. RÉGIMEN DE CAUDALES DURANTE SEQUÍAS PROLONGADAS.

En la bibliografía según (PÉREZ, 2010). El régimen de caudales ecológicos durante sequías prolongadas está caracterizado por una distribución mensual de mínimos y se ha determinado mediante simulación de la idoneidad del hábitat. En los resultados de la simulación del hábitat se ha establecido un umbral de relajación con el objetivo de permitir el mantenimiento de un caudal que permita la supervivencia de las diferentes especies durante un determinado periodo de tiempo. La distribución mensual de los caudales correspondientes a este régimen es proporcional a la distribución mensual correspondiente al régimen ordinario de caudales ecológicos, con el fin de mantener el carácter natural de la distribución de mínimos, conservando las características hidrológicas de la masa de agua. La adaptación desde el régimen ordinario será proporcional a la situación del sistema hidrológico, definida según los indicadores establecidos en el Plan Especial de

Actuación en Situaciones de Alerta y Eventual Sequía (PES), teniendo en cuenta las curvas combinadas elaboradas para tal fin, y evitando, en todo caso, deterioros irreversibles de los ecosistemas acuáticos y terrestres asociados. Paralelamente al proceso de implantación del régimen de caudales ecológicos se llevará a cabo una revisión del plan emergente de sequías (PES), por lo que la evaluación de las sequías prolongadas y la aplicación al régimen de caudales podrán analizarse de una manera más pormenorizada en este periodo.

1.6.1 DISTRIBUCIÓN TEMPORAL DE CAUDALES MÍNIMOS.

En (Hidráulicos, 1999) la resolución 22/94 se establecen caudales diarios de entrega de los embalses para el mantenimiento del caudal ecológico, pero no se tiene en cuenta la disminución de las masas de agua, ni se establecen caudales para periodos secos o de lluvias

La distribución temporal de caudales mínimos se establece mediante la selección de periodos homogéneos y representativos en función de la naturaleza hidrológica de la masa de agua y de los ciclos biológicos de las especies autóctonas, identificándose al menos dos períodos distintos dentro del año.

Otro aspecto importante en el estudio de los caudales ecológicos lo constituyen el cuidado de las cuencas hidrológicas.

1.7. APROXIMACIÓN HIDROLÓGICA.

Dependiendo de las características (MARTÍNEZ, 2013) en aquellas corrientes o cuerpos de agua de propiedad nacional a nivel de cuenca hidrológica donde se pretenda conservar su régimen hidrológico natural, se deberá reservar un régimen

y volumen anual de agua para uso ambiental o para la conservación ecológica conforme a la Ley de Aguas Nacionales.

Elementos de los caudales ecológicos a determinar:

- Régimen anual de caudales con finalidad ambiental.
- Volumen anual de agua a reservar con finalidad ambiental.

Procedimiento a seguir:

Si seguimos lo planteado por (MARTÍNEZ, 2013) El procedimiento para determinar el volumen de reserva con finalidad ambiental es el siguiente:

1. Determinar el objetivo ambiental para la cuenca.
2. Según el objetivo ambiental y la naturaleza de la corriente (permanente o intermitente), considerar el intervalo de porcentajes del Ecurrimiento Medio Anual (EMA) como valores de referencia para caudal ecológico según aparece en la Tabla 5.

Tabla 5 Valores de referencia para asignar un volumen de caudal ecológico conforme a los objetivos ambientales.

OBJETO AMBIENTAL	ESTADO DE CONSERVACION	CAUDAL ECOLÓGICO (% EMA)	
		CORRIENTES PERENNES	CORRIENTES TEMPORALES
A	Muy bueno	≥40	≥20
B	Bueno	25-39	15-19
C	Moderado	15-24	10-14
D	Deficiente	5 - 14	5 - 9

3. Asignar un porcentaje de reserva dentro del intervalo definido por el objetivo ambiental. El ajuste al interior del intervalo definido por el objetivo ambiental deberá realizarse de mayor a menor (pe. Objetivo ambiental "B": 40, 39, 38,..... 26), considerando en todo momento el interés de conservación de las cuencas (con especial observancia en las Áreas Naturales Protegidas y la conservación de especies amenazadas), los posibles conflictos con el resto de usos del agua o las condiciones particulares de la masa de agua (como la contaminación o alteración morfológica).

4. Considerando los antecedentes expuestos, así como el procedimiento a seguir, a partir del Caudal Medio Mensual para la serie sujeta al análisis, se elige el caudal ecológico.

Esta es otra razón por la que no se puede cumplir a cabalidad el cálculo de caudal por los métodos tradicionales ya que no existe una serie estadística con más de 25 años y no se cuenta con una estación que registre a cabalidad las precipitaciones, radiaciones solares y el cálculo del caudal según periodo de lluvia o de sequía por lo que damos las formas más simples de calcular estos caudales.

CARACTERIZACIÓN DEL RÉGIMEN DE CRECIDAS.

El proceso para la estimación de la caracterización del régimen de crecidas de acuerdo a (MARTÍNEZ, 2013),(caudal generador) en la Demarcación Hidrográfica del Tinto, Odiel y Piedras se ha llevado a cabo por dos métodos diferentes, que se presentan a continuación.

1.8.Conclusiones del capítuloI.

- La definición del régimen de caudal ecológico es algo relativamente nuevo en el entorno técnico cubano y son muy pocos o casi ninguno los estudios de investigación para determinar los caudales que deben permanecer en una determinada corriente hídrica.
- Las explotaciones de los recursos por parte de los humanos sobre las cuencas hidrográficas condicionan los procesos naturales en los ríos,

afectando en gran manera el régimen de caudal de la corriente, la calidad del agua y los ecosistemas, por lo que se requiere un modelo alternativo de importancia social, ambiental, y económica que intervenga en lo cultural para la conservación de los ecosistemas de agua dulce.

- En este capítulo se han sugeridos y analizados metodologías en países donde los ríos y ecosistemas presentan características muy particulares, necesitándose una metodología de cálculo para el establecimiento de los cálculos de caudales ecológicos en nuestro país, la cual no cuenta con una normativa actualizada, ya que estas deben contar con una evaluación previa que permita su aplicación y adaptación.
- No es necesario por lo planteado en este capítulo seguir al pie de la letra ninguno de los métodos antes expuestos, siendo mejor definir de acuerdo a los recursos y datos con los que se cuentan.

CAPÍTULO II PROCEDIMIENTOS GENERALES PARA EL CÁLCULO DEL CAUDAL ECOLÓGICO

El estudio del establecimiento de los caudales mínimos ecológicos así como la evaluación de los mismos se realizará en el Río Sagua la Chica del municipio de Encrucijada, provincia de Villa Clara.

En este capítulo se realizarán procedimientos necesarios para determinar el caudal ecológico de acuerdo con los métodos de cálculo presentados previamente y la experiencia de cálculo propuesta en este trabajo será la utilización del cálculo de caudal ecológico por la combinación de los métodos hidrológicos, el hidráulico

el analógico los que proporcionan información valiosa con el mínimo de datos y recursos como son los explicados en el capítulo anterior

Es importante mencionar que la información utilizada no busca abarcar la totalidad de los métodos estudiados sino tomarla como información de referencia, obtenida de acuerdo a los materiales aportados por el Instituto de recursos Hidráulicos de Villa Clara, no se pretende en este trabajo abarcar la totalidad de la información aportada ni utilizar el cálculo del caudal ecológico por cualquier de los 4 enfoques mencionados con anterioridad.

2.1. Cálculo de caudales medios.

Como puede constatarse los métodos de cálculo del caudal ecológico, existen varios procedimientos que requieren la obtención del caudal medio de las corrientes y que en ocasiones no puede conocerse sino mediante métodos indirectos de cálculo o mediciones directas realizadas como trabajo de campo por los especialistas.

Con la desventaja que estas últimas resultan costosas, abrumadoras y no permiten reflejar un comportamiento histórico de las corrientes; el caudal medio es una característica básica de las cuencas hidrográficas y cuya determinación exacta depende de la exactitud de los aforos, de la variación del caudal, y de la duración del período de observaciones y de la cantidad de estaciones de aforo en la propia cuenca.

Dado que contar con datos de caudal medio en todos los sitios de interés es poco probable, existen métodos alternos para su cálculo y que tienen como requisito la afinidad entre cuencas, afinidad que depende de las características fisiográficas e hidrográficas de las mismas como las presentadas en el siguiente numeral, además de la topografía, geología, clima, suelo, vegetación, superficie de agua, etc.

El método que nos permite obtener valores de caudales medios en los sitios de interés es el denominado método analógico, el cual se emplea para determinar el caudal medio de una cuenca sin estaciones de aforo. Según este método, el

caudal medio está dado por(Organización de las Naciones Unidas para la Educación, 1982).

De acuerdo a lo anterior se propone una metodología simple de cálculo en el que se realizará de la siguiente forma:

Se calculará el caudal de la cuenca según datos de aporte de lluvias y promedios mensuales y anuales, por la ecuación de continuidad Ec. 1, relacionada al área de la cuenca ver anexos de ecuaciones

La tabla a continuación según datos aportados por (Hidráulicos, 2017b) se muestran las precipitaciones promedios anuales datos necesario para el cálculo de las precipitaciones.

Tabla 2.1: Precipitaciones promedio anual

Años	Ene	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Tot. anual	Promedio anual
2012	0	33,5	30,5	65	371	240,2	83	275	74	443,5	8	67,5	1691,2	140,93
2013	5,5	59,5	102,5	140	138	59	176	113,2	226	170,3	191,8	13,3	1395,1	116,26
2014	81,4	0	0	78,5	204,1	141,5	57,9	141,8	143,3	107,6	77,8	45,3	1079,2	89,93
2015	41,3	0	7,6	30	76,9	61,2	103,5	256,1	108,4	309,7	135,4	80,7	1210,8	100,90
2016	255,8	0	84,3	98,2	68,3	70,1	0	180,8	217,8	191,5	0	55,3	1222,1	101,84

2.1.1 Caracterización morfométrica de cuencas.

La información que a continuación se presenta tiene como base el documento Guía brindado por Recursos Hidráulicos. El establecimiento de cada uno de los siguientes parámetros es de utilidad para el cálculo de los Qe así como para la descripción de las zonas de estudio donde se desea conocer su magnitud.

Además que permite realizar la estimación de éstos de manera segura en sitios de interés que no cuentan con registros, al analizar la respuesta que teóricamente

presentan las cuencas hidrográficas ante eventos de lluvia reflejados en últimas en la escorrentía superficial.

Área (A)

El área de la cuenca es probablemente la característica morfométrica e hidrológica más importante. Está definida como la proyección ortogonal de toda el área de drenaje de un sistema de escorrentía dirigido directa o indirectamente a un mismo cauce natural.

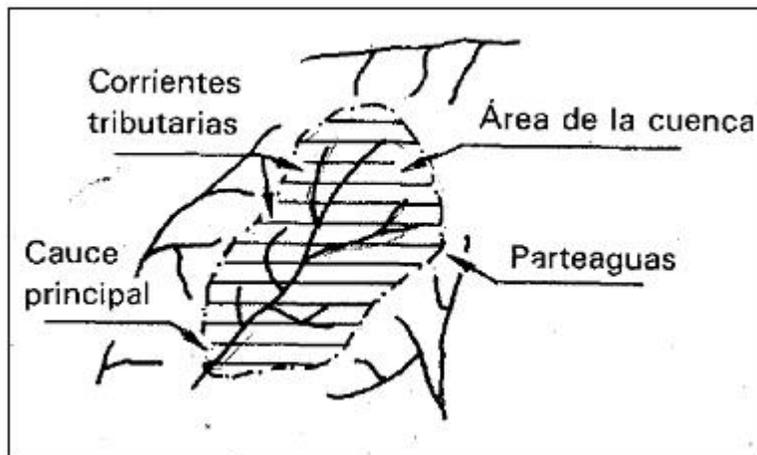


Figura 2.1 Área de una cuenca hidrográfica (MARTÍNEZ, 2013)

Perímetro (P)

El perímetro de la cuenca o la longitud del parte aguas de la cuenca, es un parámetro importante, por lo que no se debe obviar a la hora de la realización de los cálculos

Índice de compacidad o de Gravelius (Kc)

Se trata de un indicador adimensional de la forma de la cuenca, basado en la relación del perímetro de la cuenca con el área de un círculo igual a la de la cuenca (círculo equivalente); de esta manera, entre mayor sea el coeficiente más distante será la forma de la cuenca con respecto al círculo. Para valores cercanos o iguales a uno, la cuenca presenta mayor tendencia a crecientes o concentración de altos volúmenes de aguas de escorrentía. (MARTÍNEZ, 2013) plantea que un aspecto importante es el índice de compacidad. Ver anexos Ec. 3

Otros autores (Cuba, 2016) plantean que el valor de K_c es uno y corresponde a una cuenca circular. A medida que aumenta K_c , mayor es la irregular de la cuenca y su desviación de la forma circular.

Factor de forma (F)

Es la relación entre el ancho medio y la longitud axial de la cuenca. La longitud axial de la cuenca se mide cuando se sigue el curso de agua más largo desde la desembocadura hasta la cabecera más distante en la cuenca.

Este parámetro mide según (MARTÍNEZ, 2013), la tendencia de la cuenca hacia las crecientes rápida y muy intensa a lentas y sostenidas. Es un parámetro adimensional. Ver anexos Ec. 4

Índice de alargamiento (Ia)

El índice de alargamiento es otro parámetro que muestra el comportamiento de forma de la cuenca, (MARTÍNEZ, 2013) pero esta vez no respecto a su redondez sino a su tendencia de ser de forma alargada, en relación con la longitud axial, y con el ancho máximo de la cuenca. Aquellas cuencas que registran valores mayores a uno presentan un área más larga que ancha, obedeciendo a una forma más alargada. Igualmente, este índice permite predecir la dinámica del movimiento del agua en los drenajes y su potencia erosiva o de arrastre queda definido según Ec.5 de los anexos.

Índice asimétrico

(MARTÍNEZ, 2013) plantea que es la relación del área de las vertientes, mayor (A_{may}) y menor (A_{men}), las cuales son separadas por el cauce principal. Este índice evalúa la homogeneidad en la distribución de la red de drenaje, pues si se tiene un índice mucho mayor a 1 se observara sobre la cuenca que el río principal estará recargado a una de las vertientes, lo cual implica una heterogeneidad en la distribución de la red de drenaje aumentando la descarga hídrica de la cuenca a esta vertiente, incrementando en cierto grado los niveles de erodabilidad a causa de los altos eventos de escorrentía superficial obtenidos.

Y queda definido por la ecuación Ec.6 de los anexos

Pendiente media de la cuenca

(Escobar, 2010, MARTÍNEZ, 2013).coinciden que esta característica controla en buena parte de la velocidad con que se da la escorrentía superficial y afecta, por lo tanto, el tiempo que lleva el agua de la lluvia para concentrarse en los lechos fluviales que constituyen la red de drenaje de las hoyas.

La pendiente es la variación de la inclinación de una cuenca, su determinación es importante para definir el comportamiento de la cuenca respecto al desplazamiento de las capas del suelo(erosiónsedimentación),puesque,enzonas de altas pendientes se presentan con mayor frecuencia los problemas de erosión; mientras que en regiones planas aparecen principalmente problemas de drenaje y sedimentación.

La siguiente tabla muestra la clasificación de las cuencas según la pendiente

Tabla 2.2.Clasificación de cuencas de acuerdo con la pendiente media.

PENDIENTE MEDIA (%)	TIPO DE RELIEVE
0 – 3	Plano
3 – 7	Suave
7 – 12	Medianamente accidentado
12 – 20	Accidentado
20 – 35	Fuertemente accidentado
35 – 50	Muy fuertemente accidentado
50 - 75	Escarpado
>75	Muy escarpado

La cuenca en estudio cuenta con un relieve bastante regular con pendiente que oscilan entre 3 a 7 %, contando con relieves de montañas por ser una cuenca ubicada en la salida del río Sagua la Chica pero como no existe unificación de criterios tomamos para la realización de este trabajo un tipo de relieve suave con una pendiente entre 3-7%.

No obstante aunque contamos con los valores dependiente aportados por el INRH, calculamos la pendiente para corroborar el valor de la misma

Por el método de Alvord (Escobar, 2010) se puede establecer la estimación de la pendiente media de la cuenca y se realiza el siguiente cálculo por la ecuación Ec.7 de los anexos :

Coefficiente orográfico

Es la relación según (MARTÍNEZ, 2013) y (Escobar, 2010) entre el cuadrado de la altitud media del relieve y la superficie proyectada sobre un plano horizontal. Este parámetro expresa el potencial de degradación de la cuenca, crece mientras que la altura media del relieve aumenta y la proyección del área de la cuenca disminuye. Por esta razón si el valor del coeficiente orográfico es <6 , representa un relieve poco accidentado propio de cuencas extensas y de baja pendiente; y si el valor es >6 , es un relieve accidentado y se calcula según Ec.8 de los anexos

Densidad de drenaje

Esta se define por lo planteado por (Escobar, 2010, MARTÍNEZ, 2013) como la relación entre la longitud total de los cursos de agua de una cuenca y su área total. Su cálculo se realiza por la Ec.9 de los anexos

Usualmente toma valores entre 0.5 Km/Km^2 para hoyas con drenaje pobre hasta 3.5 Km/Km^2 o valores mayores para hoyas excepcionalmente bien drenadas, lo cual genera grandes volúmenes de escurrimientos, al igual que mayores velocidades de desplazamiento de las aguas (MARTÍNEZ, 2013).

Constante de estabilidad del río

La constante de estabilidad de un río es el inverso de la densidad de drenaje. Representa según (MARTÍNEZ, 2013 , Escobar, 2010), físicamente, la superficie de cuenca necesaria para mantener condiciones hidrológicas estables en una unidad de longitud de canal. Puede considerarse, por tanto, como una medida de la estabilidad de la cuenca y la obtendremos según Ec.10 de los anexos

Pendiente del cauce

(Escobar, 2010, MARTÍNEZ, 2013) definen que: La pendiente del cauce es uno de los factores importantes que inciden en la capacidad que tiene el flujo para transportar sedimentos, por cuanto está relacionada directamente con la velocidad del agua.

Para el cálculo de la pendiente del cauce se puede emplear el método de las elevaciones extremas y el método de Taylor-Schwarz.

En el caso de las elevaciones extremas, consiste en determinar el desnivel entre el punto más elevado y el punto más bajo del río en estudio y luego dividirlo entre la longitud del mismo cauce tal y como se presenta en el anexo de ecuaciones como la Ec.11.

2.1.2 CÁLCULO DEL CAUDAL GENERADOR.

El caudal generador se puede aproximar por el caudal de la Máxima Crecida Ordinaria, QMCO, que a su vez, siguiendo las indicaciones recogidas en Hernández et al. (2008), se calcula según la expresión Ec.11 y Ec.12 en base a la serie de máximos caudales medios diarios en régimen natural. Por tanto, QMCO

($m^3 \cdot s^{-1}$) se calcula a partir de los valores de la media (Q_m) y del coeficiente de

variación (CV), calculados mediante las expresiones (14) y (15) respectivamente.

Con estos datos aparece la desviación típica que se puede calcular usando la expresión Ec.16 de los anexos pero no se realiza en este trabajo ya que no nos interesa saber la desviación de estos caudales solo interesa conocer un valor de caudal ecológico y ver si es posible establecer cálculos simplificados utilizando el mínimo de datos

Tabla 2.3. Datos estadísticos de la cuenca para el cálculo del caudal de máxima crecida ordinaria

	Rio Sagua la chica
Qm	
σ	21.67
Cv	0.0064 adimencional
Qmco (m ³ /s)	2388.71

El dato estadístico se calculó para presentar una simplificación de los cálculos en el tercer capítulo de este trabajo

Cálculo de la evapotranspiración

Otro valor a tener en cuenta para la estimación de los caudales ecológicos que corresponde a la evapotranspiración, este parámetro se calcula teniendo en cuenta la perdida de agua por este concepto y se aporta esta formulación para tener una relación que nos permita acercarnos más al valor real de caudal ecológico

La evapotranspiración de acuerdo a es la conjunción de dos procesos: la evaporación y la transpiración. La transpiración es el fenómeno biológico por el que las plantas transfieren agua a la atmósfera.

Toman agua del suelo a través de sus raíces, una pequeña parte es para su nutrición y el resto lo transpiran. Como es difícil medir ambos procesos por

separado, y además en la mayor parte de los casos lo que interesa es la cantidad total de agua que se pierde a la atmósfera, se calculan conjuntamente bajo el concepto mixto de evapotranspiración.

Existen numerosas fórmulas, teóricas o semiempíricas, y procedimientos de cálculo para estimar la evapotranspiración considerando parámetros climatológicos, agrícolas e hidrológicos.

.Recopilación de información

En la siguiente tabla se presenta la información requerida en el cálculo de la ET, datos que viabilizan la ejecución de los cálculos y que el especialista debe tener siempre presente se calculará según expresión Ec.17 y utilizándose el cálculo del factor eliométrico mediante el uso de la expresión Ec. 18 de los anexos de este trabajo.

Tabla 2.4: Información necesaria en la estimación de la evapotranspiración

Datos	Fuente
Precipitación, mm, y temperatura media mensual, °C	_ Servicio Meteorológico Nacional _ Boletines climatológicos
Municipio/localidades existentes en la zona de estudio y coordenadas geográficas	_ Anuario de estadístico
Uso de suelo (cobertura vegetal)	_ Cartas digitales de uso de suelo
Tipos de cultivo y superficie de siembra	_ Anuario estadístico de cultivos _ Censo agropecuario _ Informes de distritos de riego
Ciclo del cultivo o ciclo vegetativo	calcular la evapotranspiración de un cultivo de referencia utilizando la fórmula de Penman-Monteith

Fechas de siembra	-Informes de distritos de riego - Anuario estadístico de cultivos
Kc mensual para cada cultivo	-CropWat para obtener los relacionados a cultivos. _ Tablas en libros de agronomía
P porcentaje de horas sol	-Tablas en libros de hidrología

Otras formas de cálculo refieren distintos valores con relación al análisis de las curvas de duración de caudales pero no es objetivo de este trabajo por no contar con series históricas.

2.2.Determinación de una curva de duración de caudales en una cuenca hidrográfica en caso de inexistencia de datos de caudal.

Según (MARTÍNEZ, 2013), para este procedimiento se requiere una hoya hidrográfica A que sea hidrológicamente semejante a la hoya de interés B, y que posea su propia curva de duración de caudales durante un período de tiempo razonable. Para la hoya B, de interés, que no posee datos, se puede deducir su propia curva, suponiendo que la relación Q/A , para cada porcentaje de tiempo, es igual a la hoya con datos de caudal, siendo A el valor correspondiente al área de drenaje,

Este valor no se considera en este trabajo ya que no existe n valores de caudales analizados en cuencas de similitud estadística de caudales.

2.3.Conclusiones del capítuloII

- Se establecieron las formulas mínimas necesarias para realizar el cálculo del caudal ecológico

- La selección del método de cálculo no se realizó por ningún método específico se tomaron variables del método hidrológico y se le dio algún enfoque holístico.
- También es requisito para la selección de un método de cálculo, tener en cuenta el marco normativo nacional del cual se carece.

Capítulo III Análisis de los resultados.

3.1 Análisis del gasto comprendido en el periodo.

Con la reducción de las precipitaciones se ha visto comprometido el gasto de entrega para satisfacer los compromisos del abasto de agua a la población y a la agricultura la cual se ha incrementado a partir de los lineamientos de la política Económica del país, así como de las nuevas inversiones en el sector agrario.

Aunque se ha notado un alza de la entrega en el año 2016 los caudales son bastantes recortados y en el periodo de realización de este trabajo el gasto se encontraba reducido en un 35 % de entrega diaria para poder tener un cumulo de agua destinado al consumo humano.

En la tabla a continuación se muestran los gastos aportados por las presas de la cuenca.

Tabla 3.1: Gasto de aporte por las presas que alimentan la cuenca.

Embalses		2012	%	2013	%	2014	%	2015	%	2016	%
ALACRANES	Total(hm ³)	185.281		199.680		190.037		196.078		214.233	
	Agric	122.271	33,16	132.200	33,00	125.552	33,10	129.716	33,04	142.250	32,87
	Pob	1.576		1.586		1.577		1.584		1.573	

MINERVA	Total(hm ³)	48.019		65.963		69.522		64.066		58.384	
	Agric	12.522	29,22	23.476	32,30	25.686	32,17	20.311	30,87	15.689	30,07
	Pob	21.468		21.183		21.468		23.975		25.141	
LA QUINTA	Total(hm ³)	33.517		47.181		27.718		24.140		42.328	
	Agric	22.624	32,50	31.847	32,50	18.710	32,50	16.295	32,50	28.571	32,50
	Pob	0		0		0		0		0	

La diferencia existente entre el total y las entregas están dado por las pérdidas de transportación de agua a los consumidores las cuales oscilan entre el (29.22-33.16 %)de la entregada por los embalses.

Si asumimos que este gasto es reducido por la falta de precipitaciones anuales podemos decir que entre perdida de caudal por transportación y ahorro de agua se estima una pérdida total de más del 60% del caudal de aporte entregado por la presa.

Si asumimos los valores de caudal ecológico normados por la resolución 24/99 el valor anual de las presas involucradas en el estudio podemos realizar un análisis como el que sigue en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Análisis de caudal ecológico de las presas (quinquenio de estudio).

Embalses Q _{Totales}		Qe(año)	2012	%	2013	%	2014	%	2015	%	2016	%	Total
ALACRANES	(hm ³)	0,15	185.28	0,08	199.68	0,07	190.04	0,08	196.08	0,07	214.23	0,07	985.31
MINERVA	(hm ³)	0,02	48.02	0,04	65.96	0,03	69.52	0,03	64.07	0,03	58.38	0,03	305.95
LA QUINTA	(hm ³)	0,01	33.52	0,02	47.18	0,01	27.72	0,02	24.14	0,02	42.33	0,01	174.88
Total		0,17	266.82		312.82		287.28		284.28		314.95		1.466.15

La tabla 3.2 muestra como el caudal entregado no cumple con el valor aproximado del 15 % de estimación para caudales ecológicos, en el caso de Alacranes y en el caso de la Minerva este caudal es excedido hasta un uno por ciento más, lo mismo sucede para el caso de la Quinta, aunque esta presa es solo para uso agropecuario y en muchas ocasiones está deprimida por la escases de precipitaciones.

Tabla3.3: Análisis del caudal aportado anualmente y su diferencia

Presa	Gastos anual promedio	15% anual promedio	Perdidas anual promedio	Contratada anual promedio	Diferencia anual promedio
ALACRANES	197061,80	29559,27	65084,20	197.061,80	-94643,47
MINERVA	305954,13	45893,1195	19007,00	305.954,13	-64900,12
LA QUINTA	174884,04	26232,606	11367,40	174.884,07	-37600,04

En la tabla 3.3 anterior se muestra que el caudal calculado por métodos analítico no satisface la demanda ecológica ni de la entrega a los servicios contratados ya que la presa Alacranes presenta un déficit de 94.6hm³ anuales seguida de la minerva con un64.9 hm³ y la Quinta que aunque no es una presa para abasto de agua a la población su déficit está en 37.6hm³

3.2 Resultados de los Cálculos

3.2.1 Índice de compacidad o índice de Gravelius

(adimensional)

Este valor de K_c significa que la cuenca pierde la forma redondeada se puede ver en la figura 1 del presente trabajo.

3.2.2 Factor de forma

$F=0,12$ (adimensional)

3.2.3 Índice de alargamiento

$L_a=$

$L_a=2,60$ (adimensional)

3.2.4 Índice asimétrico

las

las(adimensional)

3.2.5 Pendiente media de la cuenca

$60,31$ (adimensional)

3.2.6 Coeficiente orográfico

$59,24$ (adimensional)

3.2.7 Densidad de drenaje

$D_d=$

$D_d=40,07 \text{ Km/Km}^2$

3.2.8 Constante de estabilidad del río

C=

C=0,025(adimensional)

3.2.9 Pendiente media del cauce

S=

S=2,30 (adimensional)

3.2.10 Caudal medio de la cuenca

Si analizamos el caudal calculado en relación con el caudal anual promedio de los tres envases que sumarían 677899.97 hm³tendríamosque saber que la cuenca necesita 960l/s. Pero necesitamos saber cuál será el valor a aumentar en hm³, para lo que realizamos el siguiente cálculo.

Este cálculo se realiza aplicando la siguiente formula convirtiendo el caudal en m³/s nos daría 0.00096 dando un valor de 1.47 % de diferencia en relación al aporte de caudal.

Podemosdecir que el caudal se debe aumentar en 1.5% más para poder cumplir con los servicios contratados y con el mantenimiento de los caudales ecológicos y así mantener la biótica y la flora de la cuenca.

Tabla 3.4: Precipitación del quinquenio

Años	Ene	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Total	Prom Anual
2012	0	33,5	30,5	65	371	240,2	83	275	74	443,5	8	67,5	1691,2	140,93
2013	5,5	59,5	102,5	140	138	59	176	113,2	226	170,3	191,8	13,3	1395,1	116,26
2014	81,4	0	0	78,5	204,1	141,5	57,9	141,8	143,3	107,6	77,8	45,3	1079,2	89,93
2015	41,3	0	7,6	30	76,9	61,2	103,5	256,1	108,4	309,7	135,4	80,7	1210,8	100,90

2016	256	0	84,3	98,2	68,3	70,1	0	180,8	217,8	191,5	0	55,3	1222,1	101,84
	384	93	224,9	411,7	858,3	572	420,4	966,9	769,5	1223	413	262,1	6598,4	549,87

Si analizamos los datos de la tabla anterior podemos decir que ha disminuido las precipitaciones en el quinquenio en un 18.52 % lo que nos lleva a repensar los cálculos y decir que se debe disminuir la entrega de agua a los clientes en este por ciento, y se debe realizar un analisis de balance según época del año , época seca y época de lluvia para la de terminación de los mínimos y máximos de caudal.

El caudal generador se calculara en base a la ecuación Ec.17

Ec.17

Después de calcular los valores medios y los valores de caudal medio de crecidas ordinarias podemos decir que el caudal medio que debe de entra al río es de un valor 3393.87

Si realizamos un análisis en cuanto al valor de los caudales sumando el valor de los caudales medio, el caudal medio de crecida ordinaria y el valor del caudal ecológico según demanda del río y dividimos este valor entre tres podemos sacra la siguiente tabla.

Tabla 3.5 valor del caudal ecológico necesario en el río para el mantenimiento de la biótica y la fauna .

Concepto de caudal (Q)	Q (m ³ /s)
------------------------	-----------------------

Qmco	2388,71
Qm	3393,87
Qec de aporte	0,96
Σ de caudales	5783,54
Caudalecológico medio	1927,85

El valor del caudal en el río sería de 1927.85 m³/s o 1.927 850,00 l/s.

3.2.11 Cálculo del caudal ecológico

El valor de la evapotranspiración se sumará como pérdida de caudal en el caudal ecológico.

$$ETR = P / (0.9 + P^2/L^2)^{0.5}$$

$$ETR = 549.87 / (((0.9 + P^2)/L^2)^{0.5})$$

$$ETR = 1.82 \text{ mm}$$

$$L = 300 + 25 \cdot 25 + 0.00525^3$$

$$L = 1003.13^\circ\text{C}$$

Si al cálculo del caudal ecológico le sumamos el 30% de pérdidas por transportación podemos definir que:

Caudal ecológico

Qe (m ³ /s)	0.96
Pérdidas por transportación (m ³ /s)	0.29

Pérdidas por precipitación en el quinquenio 18 % (m ³ /s)	0.17
Σ del caudal ecológico necesario (m ³ /s)	1.42

El caudal ecológico final calculado es de **1.42 m³/s o 1420 l/s**.

Podemos llegar a la conclusión que en base al cálculo de caudal y la planteada en la resolución 24/99 del INRH, que fija el valor de los caudales ecológicos para el mantenimiento de la biótica y la fauna cumple con los valores de los caudales necesario de aporte por las presas Alacranes, Minerva y La Quinta al mantenimiento de las aguas abajo del Rio Sagua La grande.

3.3 Conclusiones del capítuloIII

- Se realizaron los cálculos de caudal ecológico mínimo , el caudal medio de corridas ordinarias y el caudal medio necesario en la cuenca en épocas de lluvia ya que no existen valores medios de épocas de seca para comparar con años precedentes
- Se estimó el porcentaje de pérdidas por precipitación así como y el caudal medio ecológico en la cuenca en base a las perdidas.
- Los valores de caudal medio fueron de 3393.87 m³/s contemplados para toda época del año
- El caudal medio de corrientes ordinarias es de 2388.71 m³/s
- El caudal ecológico necesario es de 1420 l/s el que cumple con la normativa vigente hasta el momento Res. 24/99 del INRH.

Conclusiones Finales

- Según lo expuesto en el presente trabajo referido a los métodos de cálculo del caudal ecológico, existe una gran variedad de formas para su cálculo, enmarcándose en 4 grandes enfoques: hidrológico, hidráulico, hidrobiológico y holístico, cada uno de los cuales es un complemento del anterior

- Los métodos hidráulicos requieren de información hidrométrica para relacionarla con la geometría de un cauce, información que sirve de base para los métodos hidrológicos y el analógico permite relacionarlos de una forma más rápida.
- El método de cálculo que se tome, debe brindar la conservación del medio ambiente, donde se considera que el mejor contexto siempre será optar por la selección de varios métodos. Los que permitirán tomar decisiones rápidas y viabiliza los cálculos de los profesionales los que deben aumentar o disminuir el caudal en dependencia de la época del año y de la experiencia acumulada una experiencia sería el uso del método análogo combinado con el hidrológico y el hidráulico.
- Se expuso el procedimiento de cálculo simplificado para la realización del cálculo del caudal ecológico combinando varios métodos e introduciendo en este procedimiento el cálculo de la evapotranspiración factor fundamental para el determinación del caudal ecológico
- Se determinó que la cuenca hidrográfica tiene un área de 1055 km² y un perímetro de 299.08 km, un factor de forma $F = 0.12$ y un coeficiente de compacidad $K_c = 2.58$, por lo que se caracteriza siendo una cuenca grande y alargada con poca circularidad.
- Se estimó el porcentaje de pérdidas por precipitación así como y el caudal medio ecológico en la cuenca en base a las pérdidas del quinquenio las cuales están en un 18 %.
- Los valores de caudal medio fueron de 3393.87 m³/s contemplados para toda época del año
- El caudal medio de corrientes ordinarias es de 2388.71 m³/s
- El caudal ecológico necesario que entre al río es de 1420 l/s, el que es casi el valor de la norma, según Res. 24/99 del INRH, la cual debe revisarse para realizar los incrementos necesarios para que no se deteriore la biótica.

Recomendaciones

- La definición de régimen de caudal ecológico es algo relativamente nuevo en el entorno cubano y son pocos los estudios e investigaciones para la determinación del caudal que debe permanecer en una determinada corriente hidrológica después de un aprovechamiento. Por lo tanto es necesario empezar a desarrollar trabajos que permitan aplicar, construir y estructurar conocimientos sobre el régimen de caudales ecológicos enmarcados en el contexto nacional
- Realizar metodologías que sirvan de base a las autoridades ambientales en la toma de decisiones para las asignaciones del cobro de tasa por uso de agua, licencia de construcción de obras hidráulicas.
- Hacer extensivo este trabajo como referencia del cálculo de caudales ecológicos utilizando el mínimo de información.

Referencias Bibliográficas

- (WWF), W. W. F. Octubre de 2011. Caudal ecológico: salud al ambiente, agua para la gente. *World Wildlife*, 1.
- ALCAIDE, Á. 1973. Estadística Económica. *SAETA*. Madrid, España.
- BERNIS, J. M. F. 2009. *EL CAUDAL MÍNIMO MEDIOAMBIENTAL DEL TRAMO INFERIOR DEL RÍO EBRO*, Tortosa España, Cooperativa Gráfica Dertosense,.
- CUBA, P. C. D. 2016. Actualización de los Lineamientos de la política económica y social del Partido y la Revolución para el período 2016-2021. *Gaceta Oficial de La República de Cuba*. Habana: PCC.
- ESCOBAR, A. R. T. F. U. B. Y. C. 2010. *Guía Básica para la caracterización morfométricas de las cuencas hidrográficas*, Santiago de Cali.
- HIDRÁULICOS, I. D. R. 2017a. Datos sobre Río Sagua La Chica Santa Clara Recursos Hidraulicos
- HIDRÁULICOS, I. D. R. 2017b. Precipitaciones anuales de la cuenca Sagua La Chica INRH.
- HIDRÁULICOS, R. 1999. EL GASTO SANITARIO O ECOLÓGICO DE LOS CURSOS NATURALES DE AGUA INTERRUMPIDO POR PRESAS. *Resolución No. 24*. Habana: Gaceta Oficial de la República de Cuba.
- MARTÍNEZ, C. S. M. C. 2013 *SÍNTESIS METODOLÓGICA PARA LA OBTENCIÓN DE CAUDALES ECOLÓGICOS (Qe), RESULTADOS Y POSIBLES CONSECUENCIAS*. Trabajo de grado para optar al título de ESPECIALISTA EN RECURSOS HIDRÁULICOS Y MEDIO AMBIENTE, ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO.
- MINISTERIO DE CIENCIA, T. Y. M. A. C. Septiembre del 2015. PROGRAMAS DE CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN 2015. *In: PROGRAMAS DE CIENCIA, T. E. I. (ed.)*. La Habana Cuba: MINISTERIO DE CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE.
- ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA EDUCACIÓN, L. C. Y. L. C. U. 1982. Guía metodológica para la elaboración del balance hídrico de América del Sur. Montevideo, Uruguay: Oficina Regional de Ciencia y Tecnología de la Unesco para América Latina y el Caribe ROSTLAC.

- PÉREZ, L. D. 2010. Metodología para la estimación del caudal ambiental en proyectos licenciados ,Introducción al cálculo de caudales ecológicos: un análisis de las tendencias actuales *MAVDT & UNAL*.
- VELIS., J. I. Y. D. 2014. Diagnóstico Ambiental CUENCA SAGUA LA CHICA. *In: CENTRO DE ESTUDIOS Y SERVICIOS AMBIENTALES, C. V. C., DELEGACIÓN PROVINCIAL INRH VILLA CLARA (ed.)*. Villa Clara.

Anexo 1 MARCO CONCEPTUAL

El siguiente marco conceptual establece una serie de términos y su definición, que permiten una mejor comprensión de la información que se consigna en el presente trabajo.

Los términos incluidos en el marco conceptual abarcan terminología de índole hidrológica, biológica, ambiental, entre otras.

Biotopo: Lugar o parte física que ocupa una comunidad. Es el componente abiótico (no biológico) de un ecosistema.

Biocenosis: Comunidad biológica o conjunto de especies que habitan en un área determinada.

Comunidad bentónica: Organismos que habitan el fondo de los ecosistemas acuáticos.

Cuenca hidrográfica: Entiéndase por cuenca u hoya hidrográfica el área de aguas superficiales o subterráneas, que vierten a una red natural con uno o varios cauces naturales, de caudal continuo o intermitente, que confluyen en un curso mayor que, a su vez, puede desembocar en un río principal, en un depósito natural de aguas, en un pantano o directamente en el mar.

Duración: Tiempo transcurrido entre el inicio y el fin de un proceso o fenómeno cualquier éste sea.

Ecosistema: Complejo dinámico de comunidades vegetales, animales y de microorganismos y de su medio no viviente que interactúan como unidad funcional.

Epicontinental: Se dice de las zonas marinas próximas a la costa, situadas sobre la plataforma marina.

Frecuencia: Número de elementos comprendidos dentro de un intervalo en una distribución determinada. En términos de caudal ésta se refiere a que tan a menudo un caudal es igualado o excedido en un determinado intervalo de tiempo.

Hábitat: Lugar de residencia de una población en un medio; lugar en el que de forma específica viven ciertos organismos.

Ictiofauna: Conjunto de especies de peces que existen en una determinada región biogeográfica.

Magnitud: Cantidad de una variable hidrológica, hidráulica u otra.

Método: Procedimiento concreto que permite alcanzar un objetivo.

Metodología: Estudio y selección de un método para lograr un objetivo; teoría acerca de un método o el conjunto de éstos.

Periodicidad: Se refiere al momento en el cual un determinado fenómeno o evento se presenta.

Período de retorno: Tiempo promedio, en años, en que el valor del caudal pico de una crecida determinada es igualado o superado por lo menos una vez.

Resiliencia: Capacidad intrínseca del ecosistema y/o la comunidad receptora para absorber o asimilar las perturbaciones generadas por la acción del hombre, sin alterar significativamente sus características estructurales y de funcionalidad, permitiéndole regresar a su estado original una vez que la perturbación haya terminado.

Variabilidad interanual: Estudio de la variabilidad de una variable hidrológica a nivel

anual a lo largo de varios años.

Variabilidad intranual: Estudio de la variabilidad de una variable hidrológica a nivel mensual a lo largo de un año calendario.

Anexo 2

Tabla: 2 Parámetros hidrológicos utilizados para la proyección de las obras.

Nombre de la obra.	Lamina de lluvia escurrimiento Hiperanual Anual mm	Lamina de escurrimiento (Hiperanual) mm	Cv del Escurrimiento	Evaporación (Hiperanual) mm	Volumen medio (Hiperanual) hm ³	μo l/s. km ²	Qmax. 1.0 % m ³ /s
1	2	4	5	7	8	9	10
Presa Minerva	1395.0	357.0	0.46	1570	112.0	11.34	2135.0
Der. Pavón	-	-	-	-	-	-	-
Presa La Quinta	1400.0	450.0	0.54	-	79.4	13.90	1590.0
Der. Camajuani	-	240	-	1570.0	6.0	-	-
Presa Ochoita	1425	378	0.56	-	7.3	-	-

Anexo 3 Formulaciones y ecuaciones utilizadas en el trabajo

Ec .1

Donde:

Q₂: Caudal medio de la cuenca en estudio

Q₁: Caudal medio de la cuenca base afín

A₁;A₂: Áreas de las cuencas relacionadas

La ecuación que define el índice de compacidad es:

Ec.3

Donde,

Kc: Índice de compacidad o índice de Gravelius (adimensional)

P: Perímetro de la cuenca (km)

A: Área de la cuenca (km²)

Clase Kc1: Rango entre 1 y 1.25, corresponde a forma redonda a oval redonda.

Clase Kc2: Rango entre 1.25 y 1.5, corresponde a forma oval redonda a oval oblonga.

Clase Kc3: Rango entre 1.5 y 1.75, corresponde a forma oval oblonga a rectangular oblonga.

El factor de forma:

$$F = \frac{A}{L_m^2} \quad \text{Ec.4}$$

Donde:

F: Factor de forma (adimensional)

A: Área de la cuenca (km²)

L_m: Longitud de máximo recorrido (km)

índice de alargamiento es:

$$I_a = \frac{L_m}{l} \quad \text{Ec.5}$$

Donde,

I_a: Índice de alargamiento (adimensional)

L_m: Longitud de máximo recorrido (km)

l: Ancho máximo (km)

El índice asimétrico se define por:

$$I_a = \frac{A_{may}}{A_{men}} \quad \text{Ec.6}$$

Donde,

I_a: Índice asimétrico (adimensional)

A_{may}: Vertiente mayor (km²)

A_{men}: Vertiente menor (km²)

Estimación de la pendiente media de la cuenca

$$S = \frac{H}{L} \quad \text{Ec.7}$$

Donde,

Sc: Pendiente media de la cuenca de valor adimensional

D: Diferencia de nivel entre las curvas de nivel del plano topográfico empleado (Km)

A: Área total de la cuenca (km²)

Lc: Longitud de la curva de nivel (km)

Donde Lc es la sumatoria de las longitudes de todas las curvas de nivel que están dentro de la cuenca.

El coeficiente orográfico se calcula como:

Ec.8

Donde,

Co: Coeficiente orográfico (adimensional)

h: Altitud media del relieve (km)

A: Área de la cuenca (km²)

Densidad del drenaje

Dd=

Ec.9

Donde,

Dd: Densidad de drenaje (km/km²)

: Suma de las longitudes de los drenajes que ingresan en la cuenca (Km)

A: Área de la cuenca (km²)

La constante de estabilidad de un río se calcula como:

Ec.10

Donde,

C: Constante de estabilidad del río (km)

Σ : Suma de las longitudes de los drenajes que ingresan en la cuenca (Km)

A: Área de la cuenca (km²)

S=

Ec.11

Donde,

S: Pendiente media del cauce (adimensional)

Hmax: Altitud máxima del cauce (m.s.n.m.)

Hmin: Altitud mínima del cauce (m.s.n.m.)

L: Longitud del cauce principal de la cuenca (km)

CÁLCULO DEL CAUDAL GENERADOR.

Ec. 12

Ec. 13

m³/s

Ec.14

Ec.15

Donde,

Qm, es el caudal medio (m³·s⁻¹)

CV, es el coeficiente de variación (adimensional)

q_i , son los caudales máximos instantáneos de cada uno de los años de la serie

($m^3 \cdot s^{-1}$)

n , es el número total de años y

σ , es la desviación típica ($m^3 \cdot s^{-1}$), que se calcula según la expresión (16):

Ec.16

Los parámetros obtenidos para cada uno de los tramos, así como el caudal de Máxima Crecida Ordinaria se muestran en la siguiente tabla.

Calculo de la evapotranspiración

$$ETR = P / (0.9 + P^2 / L^2)^{0.5} \quad \text{Ec.17}$$

$$ETR = 549.87 / (((0.9 + P^2) / L^2)^{0.5})$$

$$L = 300 + 25 \cdot T + 0.005 T^3 \quad \text{Ec.18}$$

DONDE:

ETR = EVOTRANSPIRACION REAL (mm)

P = PRECIPITACIONES ANUAL (mm)

L= FACTOR ELIOMÉTRICO

T= TEMPERATURA MEDIA ANUAL (° c)