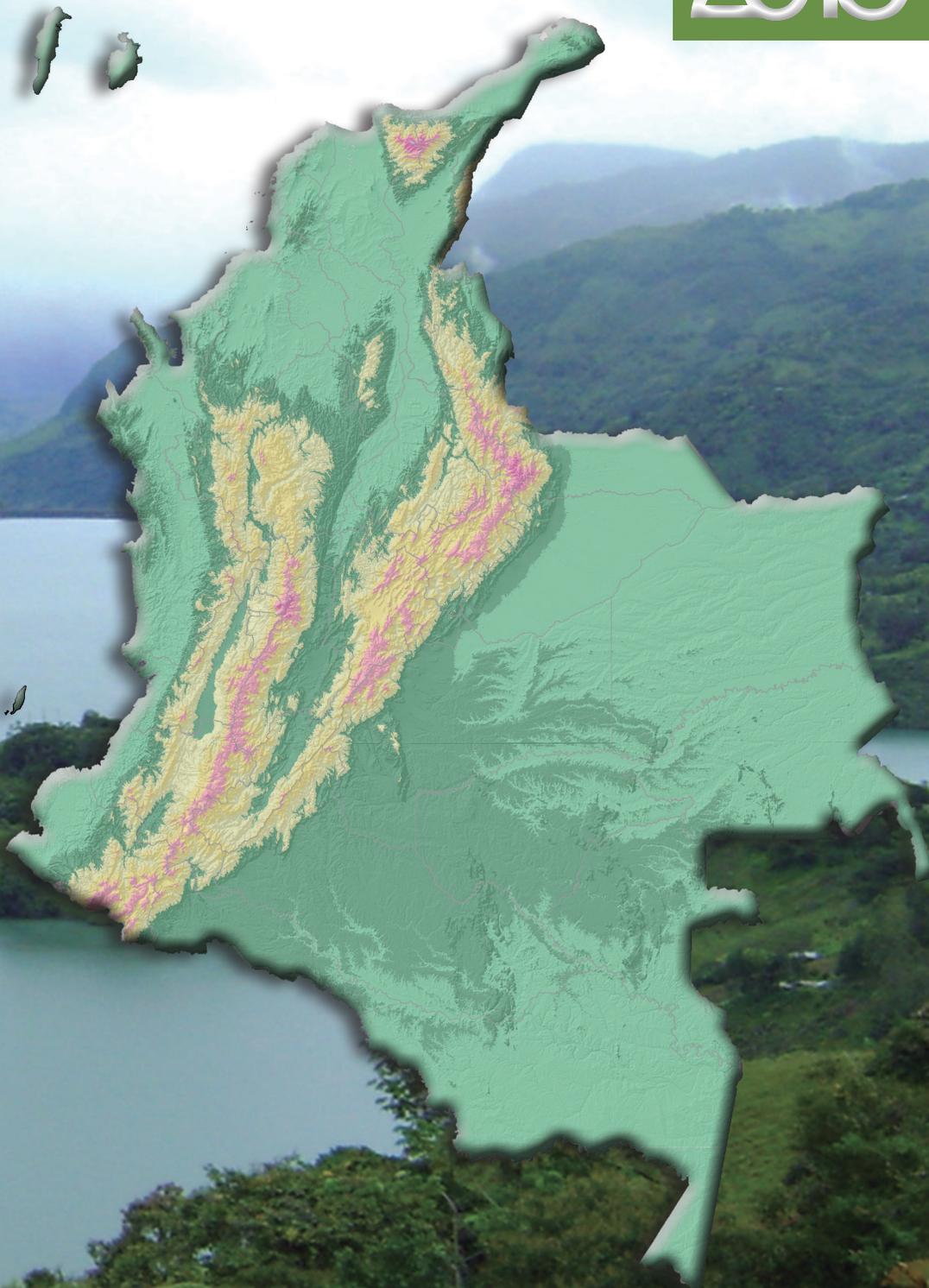


ATLAS

POTENCIAL HIDROENERGÉTICO
DE COLOMBIA

2015



 GOBIERNO DE COLOMBIA

 **upme**
Unidad de Planeación Minero Energética


IGAC

 **COLCIENCIAS**
Ciencia, Tecnología e Innovación


IDEAM

 **TODOS POR UN
NUEVO PAÍS**
PAZ EQUIDAD EDUCACIÓN



JUAN MANUEL SANTOS CALDERÓN

Presidente de la República de Colombia

TOMÁS GONZÁLEZ ESTRADA

Ministro de Minas y Energía

GABRIEL VALLEJO LÓPEZ

Ministro de Ambiente y Desarrollo Sostenible

**Unidad de Planeación Minero Energética
UPME**

Jorge Alberto Valencia Marín

Director general (2015 – actual)

Ángela Inés Cadena Monroy

Directora general (2012-2015)

Ricardo Humberto Ramírez Carrero

Subdirector de energía eléctrica (2015-actual)

Alberto Rodríguez Hernández

Subdirector de energía eléctrica (2013-2015)

Marco Antonio Caro Camargo

Coordinador del grupo de generación

William Javier Henao Ramirez
Henry Josué Zapata Lesmes
Dora Liliam Castaño Ramírez
Miguel Eduardo Barrera Triviño
Jairo Alonso Bohórquez Blanco
Jairo Riaño Moreno

**Pontificia Universidad Javeriana
PUJ**

Nelson Obregón Neira

Director proyecto

Juan Pablo Macías Acevedo
Bernardo Díaz Orjuela
Pedro León García Reinoso
Carlos Capachero Martínez
Javier Fernando Méndez Monroy
Antoine Luis Daniel Defeyer
Paula Andrea Villegas González
Jessica Daniela García Gómez
Miguel Ángel Vanegas Ramos
Ivonne Janeth Moreno Bedoya
Luis Joseph Flores Zabala
Zulma Milena Useche Vargas
Deisi Carolina Urquijo Merchán
Karen Yisset Fernández Delgado
Adriana Carolina Salinas Talero
Constanza Carolina Castelblanco

Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación

COLCIENCIAS

Yaneth Giha Tovar

Dirección general (actual)

Alejandro Olaya Dávila

Subdirección general

Yesid Ojeda Papagallo

Gestor (E) del Programa Nacional de Investigación en Energía y Minería

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales

IDEAM

Ómar Franco Torres

Director general

Nelson Ómar Vargas Martínez

Subdirector de hidrología

María Teresa Martínez

Subdirector de meteorología

Olga Cecilia González

Fabio Andrés Bernal Quiroga

Martha García Herrán

María Constanza Rosero Mesa

Instituto Geográfico Agustín Codazzi

IGAC

Ana Victoria Rincón Martínez
Carlos Andrés Franco Prieto
Vilma Lucía Inés Perez Valencia

Luz Kelly García Conde
Yenny Carolina Moreno Saboya

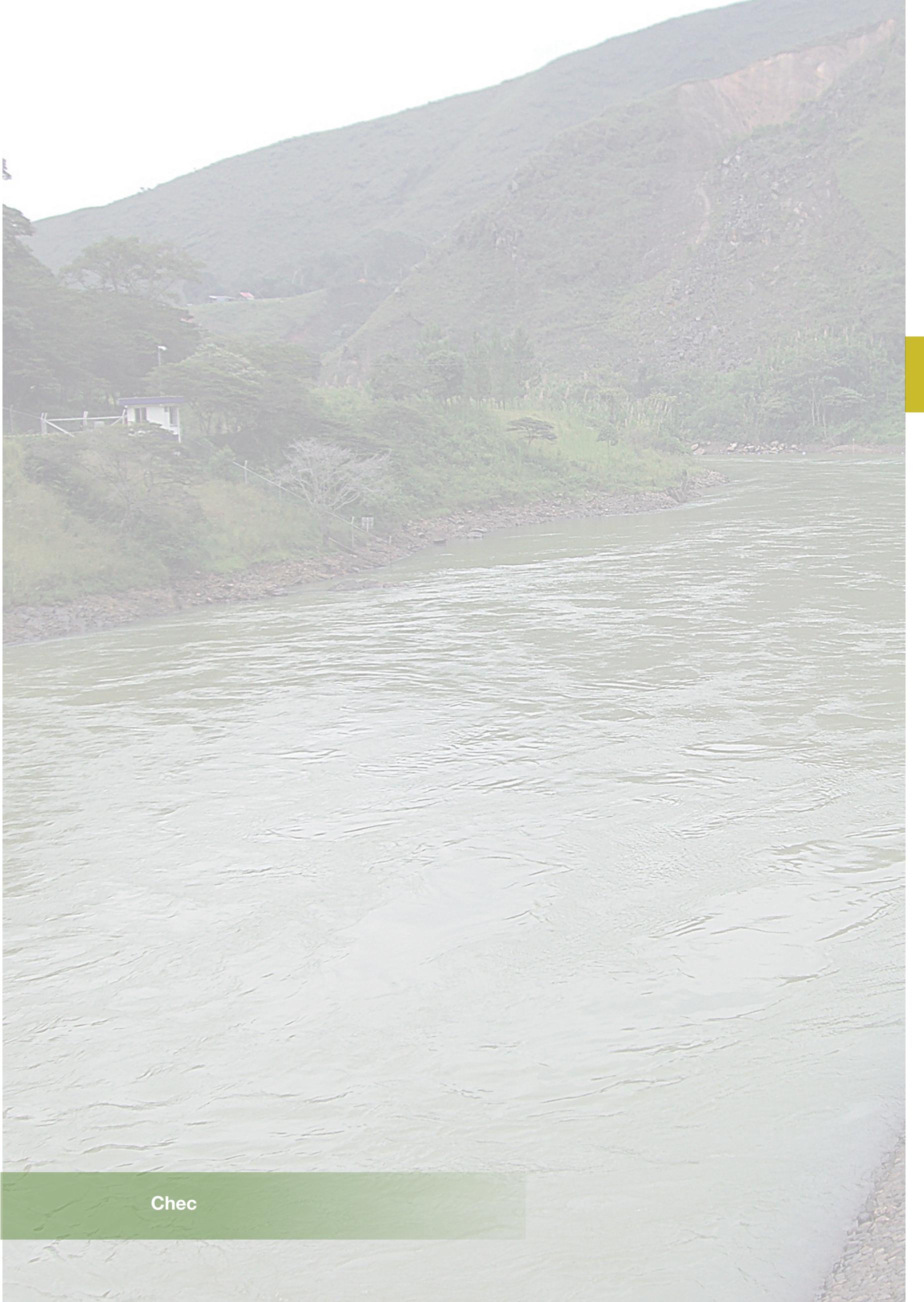


Agradecimientos

Chec
Autor: Ingfocol Ltda

Este proyecto hace un reconocimiento a las oficinas administrativas, jurídicas y, en general, a los funcionarios y exfuncionarios de COLCIENCIAS, la UPME, el IGAC y el IDEAM, que participaron en este proyecto, sin cuyo aporte no hubiese sido posible la elaboración del atlas. De igual manera, a todo el equipo de trabajo de la Pontificia Universidad Javeriana y a las entidades que suministraron información cartográfica, social y ambiental del país: Instituto de investigación de recursos biológicos Alexander Von Humboldt y al Instituto Colombiano de Antropología e Historia (ICANH).

Un reconocimiento especial a las empresas del sector hidroeléctrico por la participación en reuniones y talleres que se realizaron para que el atlas se hiciera realidad.



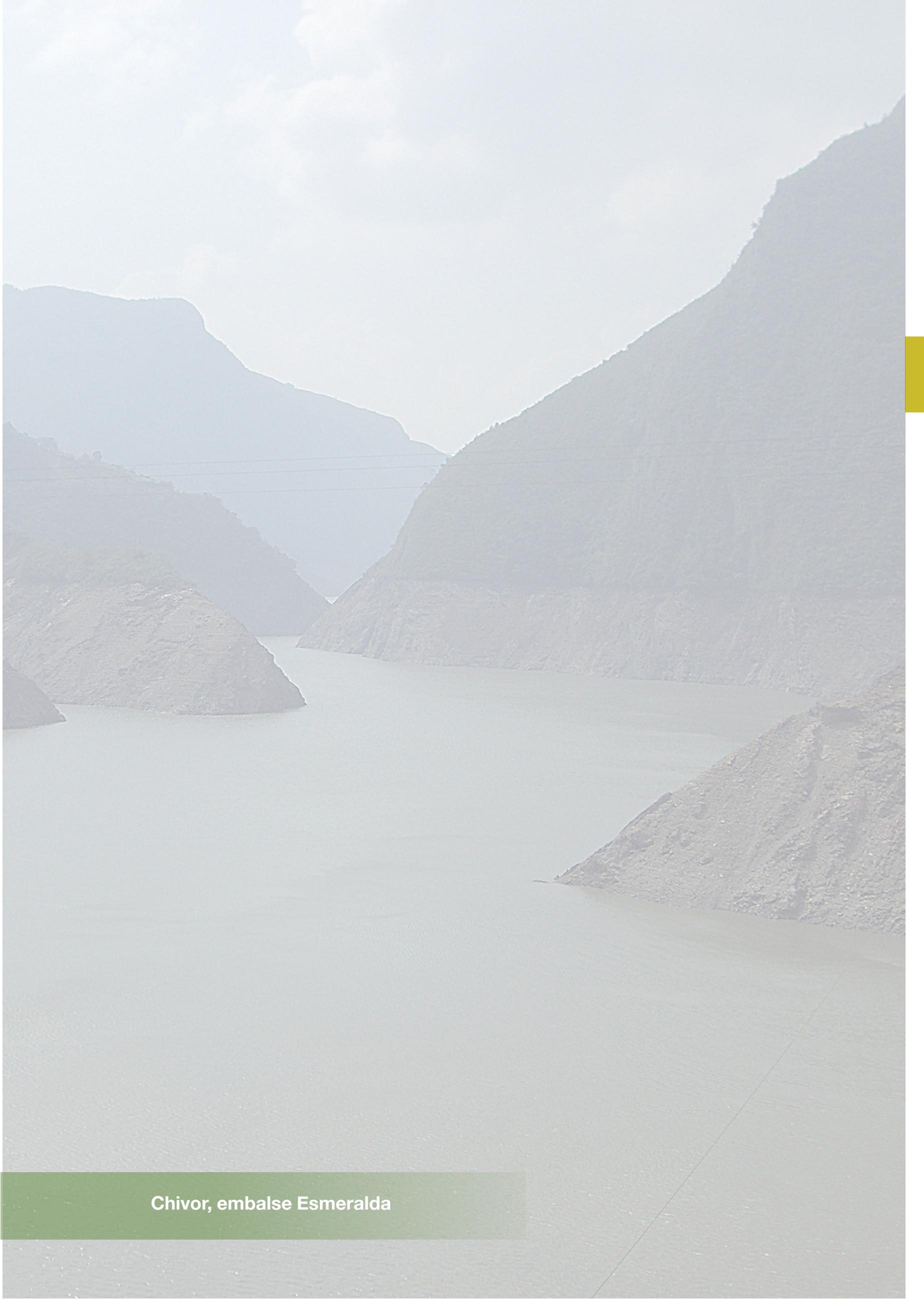
Chec



Chec
Autor: Ingfocol Ltda

Contenido

Prólogo	15
Presentación	17
Capítulo 1 HIDROENERGÍA	25
Capítulo 2 AGUA SUPERFICIAL	33
Capítulo 3 REGIONALIZACIÓN HIDROLÓGICA	37
Capítulo 4 EVALUACIÓN DE POTENCIAL HIDROENERGÉTICO	73
Capítulo 5 ASPECTOS SOCIALES, ECONÓMICOS Y AMBIENTALES DEL POTENCIAL HIDROENERGÉTICO	101
Bibliografía	129
Glosario	133
Anexos	137



Chivor, embalse Esmeralda



Lista de mapas

Chivor, embalse Esmeralda
Autor: Ingfocol Ltda

Mapa 3.1. Relieve	49
Mapa 3.2. Estaciones de caudal suministradas por el IDEAM	50
Mapa 3.3. Estaciones de caudal utilizadas en la modelación hidrológica.....	51
Mapa 3.4. Cuencas hidrográficas.....	52
Mapa 3.5. Agrupación hidrológica Caribe.....	53
Mapa 3.6. Agrupación hidrológica Magdalena - Cauca.....	54
Mapa 3.7. Agrupación hidrológica Pacífico.....	55
Mapa 3.8. Agrupación hidrológica Orinoco.....	56
Mapa 3.9. Agrupación hidrológica Amazonas	57
Mapa 3.10. Agrupaciones hidrológicas	58
Mapa 3.11. Regiones hidrológicas	59
Mapa 3.12. Histograma de caudal por zona hidrográfica IDEAM	60
Mapa 3.13. Histograma de caudal Caribe	61
Mapa 3.14. Histograma de caudal Magdalena-Cauca.....	62
Mapa 3.15. Histograma de caudal Pacífico	63
Mapa 3.16. Histograma de caudal Orinoquía	64
Mapa 3.17. Histograma de caudal Amazonía.....	65



Mapa 3.18. Caudal promedio anual	66
Mapa 3.19. Curva de duración de caudal por zona hidrográfica IDEAM.....	67
Mapa 3.20. Curva duración de caudal Caribe.....	68
Mapa 3.21. Curva duración de caudal Magdalena-Cauca	69
Mapa 3.22. Curva duración de caudal Pacífico.....	70
Mapa 3.23. Curva duración de caudal Orinoquía.....	71
Mapa 3.24. Curva duración de caudal Amazonía	72
Mapa 4.1. Caudal con probabilidad de excedencia del 95% (Q95)	82
Mapa 4.2. Caída hidráulica media por subzona hidrográfica a 200 metros.....	83
Mapa 4.3. Caída hidráulica media por subzona hidrográfica a 1 kilómetro	84
Mapa 4.4. Caída hidráulica media por subzona hidrográfica a 5 kilómetros.....	85
Mapa 4.5. Restricciones socioambientales.....	86
Mapa 4.6. Potencial hidroenergético	87
Mapa 4.7. Potencial hidroenergético Magdalena- Cauca.....	88
Mapa 4.8. Potencial hidroenergético Pacífico	89
Mapa 4.9. Potencial hidroenergético Caribe	90
Mapa 4.10. Potencial hidroenergético Orinoco	91
Mapa 4.11. Potencial hidroenergético Amazonas.....	92
Mapa 4.12. Potencial hidroenergético por subzona hidrográfica (Lc 200 metros)	93
Mapa 4.13. Potencial hidroenergético por subzona hidrográfica (Lc 1 kilómetro).....	94
Mapa 4.14. Potencial hidroenergético por subzona hidrográfica (Lc 5 kilómetros).....	95
Mapa 4.15. Grandes centrales	96
Mapa 4.16. Pequeñas centrales.....	97
Mapa 4.17. Mini centrales	98
Mapa 4.18. Micro centrales.....	99
Mapa 4.19. Pico centrales	100



Mapa 5.1. Sistema nacional de áreas protegidas.....	106
Mapa 5.2. Ecosistemas de páramos, humedales y manglares.....	107
Mapa 5.3. Proyectos hidroenergéticos	108
Mapa 5.4. Resguardos indígenas y comunidades afrocolombianas	109
Mapa 5.5. Recursos pesqueros	110
Mapa 5.6. Sitios de hallazgos arqueológicos	111
Mapa 5.7. Uso del suelo	112
Mapa 5.8. Conflicto de uso del suelo	113
Mapa 5.9. Amenaza por deglaciación y amenaza volcánica.....	114
Mapa 5.10. Amenaza por inundación.....	115
Mapa 5.11. Amenaza por desertificación	116
Mapa 5.12. Amenaza por erosión	117
Mapa 5.13. Amenaza por remoción en masa	118
Mapa 5.14. Amenaza por salinización	119
Mapa 5.15. Amenaza sísmica	120
Mapa 5.16. Índice de desarrollo humano	121
Mapa 5.17. Necesidades básicas insatisfechas.....	122
Mapa 5.18. Índice de calidad de vida	123
Mapa 5.19. Cobertura total de energía.....	124
Mapa 5.20. Sistema interconectado.....	125
Mapa 5.21. Red vial	126
Mapa 5.22. Población.....	127



Central Urrá



Central Urrá
Autor: Ingfocol Ltda

Lista de figuras

Figura 1.1. Central de Urrá.....	25
Figura 1.2. Central hidroeléctrica.....	26
Figura 1.3. Central a filo de agua.....	27
Figura 1.4. Central con embalse.....	27
Figura 1.5. Central de acumulación por bombeo.....	27
Figura 1.6. Central mareomotriz.....	28
Figura 1.7. Total mundial de la capacidad hidroeléctrica instalada (GW) por país en 2014.	29
Figura 1.8. Vertimientos GWh.....	30
Figura 1.9. Comportamiento de la demanda de energía en Colombia de los últimos 10 años.....	31
Figura 2.1. Ciclo hidrológico.....	33
Figura 2.2. Ciclo hidrológico en la cuenca hidrográfica.....	34
Figura 2.3. Limnómetro.....	35
Figura 2.4. Zona confluencia intertropical.....	35
Figura 2.5. Áreas hidrográficas.....	36
Figura 3.1. Esquema metodológico de la regionalización áreas hidrográficas.....	38
Figura 3.2. Aspectos biofísicos cuenca.....	39
Figura 3.3. Histograma de las diferencias entre el modelo SRTM y alturas geométricas IGAC.....	40



Figura 3.4. Modelo de elevación digital SRTM con puntos subestimados y sobreestimados de la red geodésica	40
Figura 3.5. Esquema metodológico para el cálculo de caudal.....	46
Figura 3.6. Metodología para el cálculo de una curva de duración de caudal sintética.....	47
Figura 4.1. Variación del potencial hidroenergético con el caudal y la caída hidráulica	74
Figura 4.2. Esquema del proceso de obtención del mapa de potencial hidroenergético...	75
Figura 4.3. Distribución en áreas hidrográficas del potencial máximo acumulado por subzona hidrográfica. Longitud (Lc) 0,2 km. Potencial Total: 508 MW	79
Figura 4.4. Distribución en áreas hidrográficas del potencial máximo acumulado por subzona hidrográfica. Longitud (Lc) 1,0 km. Potencial Total: 651 MW	79
Figura 4.5. Distribución en áreas hidrográficas del potencial máximo acumulado por subzona hidrográfica. Longitud (Lc) 5,0 km. Potencial Total: 959 MW	79
Figura 4.6. Potencial hidroenergético a filo de agua por área hidrográfica en kilovatios	80
Figura 4.7. Relación entre el potencial hidroenergético a filo de agua y la longitud de conducción.....	81
Figura 4.8. Perfil energético de la cuenca alta del río Magdalena (20 km)	81
Figura 5.1. Metodología para el análisis de los aspectos sociales, económicos y ambientales del potencial hidroenergético	101



Lista de tablas

Central Urrá
Autor: Ingfocol Ltda

Tabla 1.1. Capacidad efectiva neta del SIN a diciembre 31 de 2013 y 2014.....	30
Tabla 3.1. Parámetros empleados en el cálculo del caudal medio en el Alto Magdalena...	41
Tabla 4.1. Caídas hidráulicas en metros por área hidrográfica.....	75
Tabla 4.2. Subzonas hidrográficas con mayor potencial hidroenergético por área hidrográfica considerando una longitud L_c de 0,2 km	76
Tabla 4.3. Subzonas hidrográficas con mayor potencial hidroenergético por área hidrográfica considerando una longitud L_c de 1,0 km	77
Tabla 4.4. Subzonas hidrográficas con mayor potencial hidroenergético por área hidrográfica considerando una longitud L_c de 5km	78
Tabla 4.5. Potencial hidroenergético acumulado por tipo de central y por sitio identificado para aprovechamiento, en kilovatios.....	80
Tabla 5.1. Aspectos sociales, económicos y ambientales del potencial hidroenergético...	103



Rio Chicamocha



Prólogo

Doctor Luis Eduardo Machado Hernández

Río Chicamocha
Autor: Ingfocol Ltda

El crecimiento sostenido de la demanda de energía eléctrica, así como la evolución de los precios de los hidrocarburos, manifiestan la necesidad de diversificar las fuentes de abastecimiento energético.

Considerando que el agua es un recurso natural fundamental para el sostenimiento de la vida humana y la explotación del recurso con diferentes fines es responsabilidad del Estado, la selección de sistemas de aprovechamientos que permitan la explotación racional del recurso hídrico, así como su control, la conservación de su calidad, la compatibilización con sus diferentes usos, la definición de normas y su posterior fiscalización, es también responsabilidad pública.

En la última década del siglo XXI se ha impulsado la investigación, el estudio y el desarrollo de propuestas tecnológicas para la obtención de nuevas y mejores formas de generación energética. Estas propuestas, a menudo denominadas energías alternativas, buscan complementar los sistemas tradicionales y, en un futuro cercano, contar con soluciones energéticas sencillas que perduren en el tiempo, con un mínimo impacto ambiental, bajos costos y en cantidades que satisfagan la creciente demanda energética que se genera con el desarrollo económico e industrial.

En Colombia esta iniciativa motivó la expedición de la ley 1715 de

2014, que tiene por objeto promover el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable, en el sistema energético nacional, mediante su integración al mercado eléctrico, su participación en las zonas no interconectadas y en otros usos energéticos como medio necesario para el desarrollo económico sostenible, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la seguridad del abastecimiento energético. Dando cumplimiento también a compromisos internacionales asumidos por Colombia por medio de la aprobación del estatuto de la agenda internacional de energías renovables mediante la Ley 1665 de 2013.

Para responder a estas necesidades se están estudiando alternativas de generación de energía hidráulica que, en su mayoría, corresponden a pequeñas centrales hidroeléctricas conocidas como P_{CH}. Con la generación de energía a partir de P_{CH} se busca dar suministro a zonas aisladas que abastecen pequeños asentamientos humanos, en las que llevar una línea de interconexión del sistema eléctrico principal puede resultar costosa.

La energía hidroeléctrica fue una de las primeras formas usadas para producir electricidad; con esta fuente energética se aprovecha la transformación de la energía potencial del agua almacenada en un nivel superior, en energía cinética.



Dentro de sus principales desventajas está la dependencia de niveles de agua dados por condiciones meteorológicas de lluvia y sequía, el alto impacto ecológico en algunos casos y los altos costos por la necesidad de construcciones de obras civiles como presas y embalses y los estudios previos de factibilidad, usualmente efectuados para las grandes centrales.

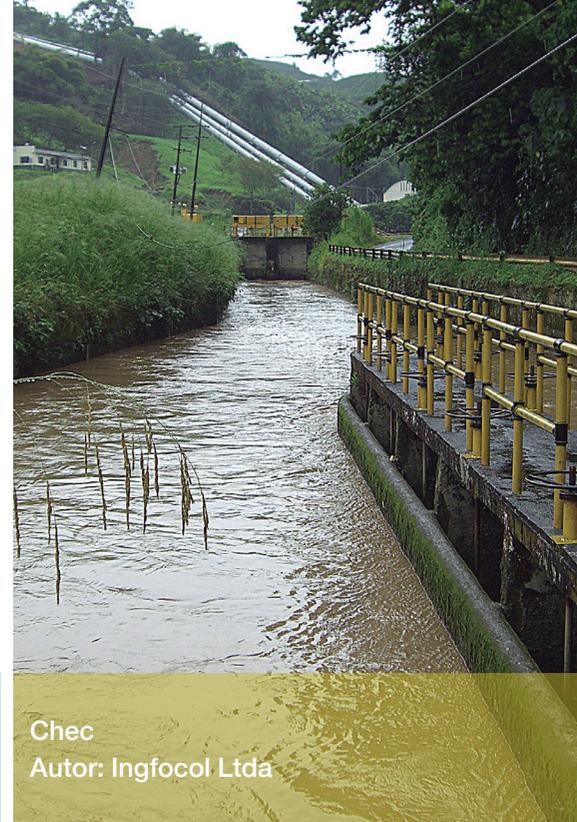
Como una herramienta técnica, cuyo fin es proveer el conocimiento y la experiencia para la valorización de sitios con potencial hidroeléctrico, el atlas resulta ser una guía que, a partir de los principios de generación hidroeléctrica, facilita la identificación de proyectos de filo de agua, base para sugerir la viabilidad técnica de un proyecto hidroeléctrico, considerando aspectos que son fundamentales cuando se realizan evaluaciones técnicas de este nivel, como son los aspectos ambientales y sociales vinculados al desarrollo social bajo el enfoque de sostenibilidad.

Por ello se estima que a partir del atlas se deben desarrollar posteriormente etapas del proceso de identificación para el aprovechamiento energético, su interrelación con los múltiples usos del recurso e iniciar inversiones en generación hidroeléctrica para cubrir el crecimiento de la demanda de energía a corto, mediano y

largo plazo. Las tareas inherentes a esas etapas son:

- Análisis del recurso hídrico disponible en la cuenca y su uso energético.
- Planteamiento de alternativas.
- Desarrollo de estudios básicos y trabajos de campo.
- Estudio de optimización del uso del recurso.
- Diseño del esquema básico de las obras para el aprovechamiento hidroeléctrico.
- Evaluación técnica, económica y ambiental.

El atlas potencial hidroenergético de Colombia es fruto de un trabajo multidisciplinario de profesionales que aplicaron las tecnologías recientes en SIG, destinadas al manejo del recurso hídrico, y enfocado a generar energía de filo de agua. Sin embargo, y debido a la forma acelerada como ha venido evolucionado la tecnología, la información contenida en este atlas requiere de un proceso de actualización y mejora continua en periodos de tiempo no muy espaciados, para adaptarlo a los criterios técnicos, ambientales y económicos vigentes en un momento dado.



Chec
Autor: Ingfocol Ltda

Presentación

¿QUÉ ES?

El atlas es un documento de referencia que, a partir de un conjunto de mapas, presenta la distribución espacial del potencial hidroenergético de Colombia, calculado para generación hidroeléctrica de filo de agua, obtenida a partir del caudal medio y de la topografía del modelo de elevación digital. Estos mapas incluyen aspectos hidrológicos, cartográficos, sociales, económicos y ambientales.

De esta manera se convierte en una referencia importante y herramienta para quienes trabajan en el sector energético, de aprovechamiento del recurso hídrico y medio ambiente, aportando conceptos técnicos, elementos para la toma de decisiones y conocimiento de las condiciones del territorio Colombiano.

El atlas se constituye en un asunto de interés social, público y de conveniencia nacional, fundamental para garantizar la planificación adecuada de un abastecimiento energético pleno y oportuno, según las indicaciones establecidas en la Ley 697 de 2001.

En Colombia, la generación de energía eléctrica se puede obtener a partir del aprovechamiento de diferentes fuentes de energía, renovables y no renovables. En la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (MAVDT, 2010) el agua es considerada un recurso natural renovable, por lo tanto la energía eléctrica

generada a partir de los aprovechamientos hídricos es considerada una energía limpia y renovable, que provoca menores impactos sobre el ambiente.

En el marco jurídico del país, la Ley 143 de 1994 menciona que el abastecimiento de electricidad debe realizarse según criterios económicos y de viabilidad financiera, asegurando un uso racional y eficiente de los diferentes recursos energéticos del país, de forma tal que se preserve la integridad de las personas, de los bienes y del medio ambiente.

En la última década se ha venido impulsando la investigación, estudio y desarrollo de propuestas tecnológicas para la obtención de nuevas y mejores formas de generación energética, buscando complementar los sistemas tradicionales, que perduren en el tiempo, con un mínimo impacto ambiental, bajos costos y en cantidades que satisfagan la creciente demanda energética que se genera con el desarrollo económico e industrial.

En Colombia esta iniciativa motivó la expedición de la Ley 1715 de mayo de 2014, que tiene por objeto promover el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable, en el sistema energético nacional, mediante su integración al mercado eléctrico, su participación en las zonas no interconectadas y en otros usos energéticos como medio necesario



Atlas

Potencial Hidroenergético de Colombia

para el desarrollo económico sostenible, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la seguridad del abastecimiento energético. Dando cumplimiento también a compromisos internacionales asumidos por Colombia a través de la aprobación del estatuto de la Agenda Internacional de Energías Renovables mediante la Ley 1665 de 2013.

En el país se han adelantado estudios sobre el potencial hidroenergético, entre los que se destacan el Estudio del Sector de Energía Eléctrica (ESEE) – 1979 y el Sistema de Información de Potencialidades Técnicas, Económicas y Ambientales para el desarrollo del Sector Minero Energético (SIPR). El primer estudio se orientó a la identificación puntual de proyectos hidroeléctricos con potencia superior a 100MW. El segundo estudio permitió definir una metodología para el cálculo del potencial hidroenergético en un tramo del río Cauca.

El proyecto que soporta las bases del presente atlas del potencial hidroenergético de Colombia, además de revisar y ajustar las metodologías planteadas por la UPME, identifica cuencas hidrográficas, emula la red de drenaje haciendo uso del modelo digital del terreno SRTM-30, contribuye a mejorar el conocimiento de los procesos hidrológicos que se relacionan con la producción de escorrentía superficial y su expresión a través de las características fisiográficas del territorio colombiano, establece una metodología para calcular los valores de caudal a lo largo de la red de drenaje e implementa una plataforma basada en Sistemas de Información Geográfica para sistematizar la evaluación de proyectos hidroenergéticos de filo de agua.

¿QUÉ CONTIENE?

El atlas de potencial hidroenergético contiene cinco capítulos, cuyo contenido principal se describe a continuación:

En el capítulo 1, hidroenergía, se define el concepto de hidroenergía, como se genera la energía potencial a partir de un cauce o cuando se encuentra embalsada,

su transformación en energía cinética, y en energía eléctrica. Clasificación, tipos y componentes principales de las centrales hidroeléctricas, y el desarrollo de la generación hidroeléctrica en Colombia y en el mundo.

En el capítulo 2, agua superficial, se presenta una síntesis del proceso de formación del agua superficial a través del ciclo hidrológico, el procedimiento para medir el caudal de agua que pasa por una estación de aforo o hidrométrica, y se describen los factores atmosféricos que inciden en la riqueza hídrica del territorio colombiano.

En el capítulo 3, regionalización hidrológica, se consignan los procedimientos utilizados para identificar las regiones hidrológicas, a partir de información topográfica e hidroclimatológica obtenida del modelo digital de terreno SRTM 30 y de la base de datos del estudio nacional del agua. Se presenta la metodología para cuantificar la disponibilidad de agua a lo largo de la red de drenaje, mediante un modelo regional basado en ecuaciones de regresión, y el cálculo de curvas de duración de caudal regionalizadas.

En el capítulo 4, evaluación del potencial hidroenergético, se describen los principales componentes del potencial: caudal y caída hidráulica. Se presentan mapas con la distribución espacial de estas variables, a partir de las cuales se calculó el potencial hidroenergético a filo de agua. Se consignan estadísticas que muestran la distribución del potencial hidroenergético en las áreas hidrográficas del país, resaltando los sitios donde se presentan los valores máximos aprovechables.

El capítulo 5, aspectos sociales, económicos y ambientales del potencial hidroenergético, contiene el análisis de estas variables, importantes a considerar en el aprovechamiento y selección de proyectos hidroenergéticos, que finalmente pueden ser llevados a estudios de diseño detallado. Se presenta el proceso metodológico de selección de variables, niveles de importancia de las



mismas, y mapas donde se consigna esta información.

En el glosario, se relacionan y definen en orden alfabético los principales términos utilizados en el atlas, que sirven de apoyo para la comprensión del documento.

En el anexo 1, se presentan los parámetros morfométricos de las cuencas involucradas en el estudio y a partir de los cuales se definieron las ecuaciones de regionalización hidrológica.

¿CÓMO SE REALIZÓ?

El trabajo es el resultado de una sinergia entre el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM; el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación, COLCIENCIAS; el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC; la Pontificia Universidad Javeriana, PUJ; y la Unidad de Planeación Minero Energética, UPME, que aportaron sus recursos técnicos y administrativos. Se contó con la opinión de los principales actores nacionales, relacionados con proyectos hidroenergéticos. Este proyecto fue financiado con recursos del patrimonio autónomo fondo nacional de financiamiento para la ciencia, la tecnología y la innovación, Francisco José de Caldas.

Como resultado de esta alianza se publica por primera vez el atlas potencial hidroenergético de Colombia, para cuyo desarrollo se llevaron a cabo las actividades que se describen a continuación:

Procesamiento del modelo digital de terreno SRTM-30 para identificar 9,139 cuencas hidrográficas, simulación de la red de drenaje IGAC a escala 1:100.000 y cálculo de los parámetros morfométricos para cada una de las cuencas identificadas.

Configuración de una base de datos con parámetros morfométricos, climáticos, hidrológicos y ambientales, con el fin de desarrollar una metodología de cálculo

de caudales y la valoración de aspectos ambientales.

Definición de regiones hidrológicas homogéneas en función de variables morfológicas e hidrológicas, usando herramientas estadísticas de clasificación como el análisis de clúster y el análisis discriminante.

Selección y caracterización de estaciones de caudal, con periodo de registro superior a 20 años, a partir de la información contenida en la base de datos del estudio nacional del agua elaborado por el IDEAM.

Implementación de un modelo regional, basado en ecuaciones de regresión y operativo con dato tipo ráster, que permite estimar caudales en puntos en donde no se dispone de registros históricos.

Determinación de curvas de duración de caudal regionalizadas, a partir del cálculo del coeficiente de variación y del caudal promedio anual, en cada punto de la red, a partir de metodologías aceptadas en el medio académico a nivel internacional y colombiano.

Implementación de un Model Builder en ArcGIS, para el cálculo del caudal en cuencas sin información, y el cálculo de los valores promedio de las variables definidas por la ecuación de regionalización, para generar un valor estimado de caudal.

Se desarrolló una metodología para estimar la oferta hídrica en Unidades Hidrográficas de Alta Resolución (UHAR), ENA 2010.

Se desarrollaron los aspectos funcionales del sistema de información geográfica y las características esenciales del aplicativo web. El sistema de información geográfica fue concebido con la intención de almacenar la información necesaria para el desarrollo del estudio, como restricciones ambientales, información socioeconómica, información hidroenergética y el potencial hidroenergético del país. Adicionalmente cualquier usuario puede verificar a través de un visor web la información necesaria para establecer un nuevo proyecto



Atlas

Potencial Hidroenergético de Colombia

hidroenergético, así como verificar la cartografía temática que soporta el atlas hidroenergético.

Por las particularidades del proyecto y las entidades que tendrán acceso al mismo, se trabajó con ArcGIS® 10.1., Oracle®, sqldeveloper y cartografía base del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Se crearon bases de datos geográficas (Geodatabase corporativa) acorde con el sistema estándar colombiano, siguiendo la proyección Magna Sirgas y el aplicativo con los metadatos actualizados según lo indica la norma NTC 4611.

Utilizando los algoritmos del DEM Surface Reconditioning System, desarrollado en el año 1997 por el Centro de Investigación de Recursos Hidráulicos de la Universidad Texas y el D8 (O'Callaghan and Mark, 1984), se desarrollaron aplicativos específicos para el procesamiento del modelo digital del terreno cuyo propósito fue: definir la red de drenaje, identificar áreas de drenaje, definir tramos de río relacionados con área de aportación, cota, pendiente y longitud, y la caracterización fisiográfica de los puntos de cierre de cuencas en los sitios donde existen estaciones hidrométricas.

Adicionalmente se desarrollaron dos aplicativos uno vía web y uno inhouse; en el aplicativo web, un promotor puede ingresar los datos del proyecto hidroenergético, en cualquiera de sus fases, de acuerdo con los requerimientos de las resoluciones 0052 de 2012 y 0638 de 2007. Este aplicativo es funcional pues solicita, una vez el promotor cuente con los documentos necesarios, un concepto de potencial por parte de la UPME.

En este aplicativo web se relaciona el estado de evaluación de proyectos hidroeléctricos, expedición de certificados y generación de reportes. Algunos usuarios podrán realizar sólo consultas, otros podrán descargar información y otros podrán actualizar las bases de datos. Se dispondrá de un directorio de usuarios activos de la UPME, en el que se

reportarán las actualizaciones y reportes generados por el sistema.

Una vez el promotor solicite el concepto de potencial, la UPME puede emitir el concepto de potencial a través del aplicativo inhouse. Este se desarrolló como un addin en ArcGIS® y allí se pueden identificar redes y áreas de drenaje, definición de tramos de río en cuanto a área de aportación, cota, pendiente y longitud, la caracterización fisiográfica de los puntos de cierre de cuencas hidrométricas; y otras variables que impliquen restricción o vía libre del proyecto, para el cual el promotor está solicitando el concepto de potencial.

Metodología para evaluar proyectos hidroeléctricos, implementada en un sistema de información geográfica. Esta herramienta facilita las tareas de evaluación de proyectos, gracias a la sistematización de la información requerida para la evaluación de los mismos. Se diseñó una base de datos geográfica (Geodatabase, GDB), alfanumérica y documental que facilita el seguimiento y acceso a la información por parte de la autoridad competente en el ámbito local, regional y nacional. Esta GDB almacena la integración con las bases de datos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, del Ministerio de Minas y Energía y del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, en forma de coberturas tipo shape versión 2.0, datos alfanuméricos en tablas o coberturas ráster.

Se realizaron talleres y reuniones con el fin de socializar el proyecto y contar con el apoyo y participación de los actores e instituciones nacionales, de mayor influencia y conocimiento del sector hidroenergético en el país. El resultado fue positivo respecto a metodologías, modelos para evaluar el potencial hidroenergético, y valorar las variables a incorporar en el componente social, económico y ambiental.



Reporte de los talleres y reuniones realizados durante el proyecto

Taller o reunión	Objetivo	Lugar	Fecha
1. Taller de lanzamiento del proyecto	Contar con el apoyo y participación de los actores e instituciones nacionales, de mayor influencia y conocimiento del sector energético en el país, en el desarrollo del proyecto. Además el taller incluyó una consulta a expertos, a través de la cual se realizó la valoración de la importancia de los aspectos sociales, económicos y ambientales utilizados para evaluar el potencial hidroenergético.	Pontificia Universidad Javeriana	9 de septiembre del año 2013
2. Taller regional	Contar con el apoyo, retroalimentación y participación de los actores e instituciones representativos del sector social y ambiental, en el desarrollo de la metodología social, económica y ambiental.	Universidad de Antioquia	3 de diciembre del año 2013
3. Reuniones Acolgen	Socializar el enfoque metodológico del proyecto y recibir retroalimentación de los avances del proyecto.	Acolgen	15 de agosto del año 2013 16 de junio del año 2014
4. Taller-reunión de expertos Emgesa	Socializar el enfoque metodológico del proyecto y recibir retroalimentación de los diferentes sectores al interior de la empresa (ambiental, social e hidrológico).	Emgesa	9 de agosto del año 2013
5. Reunión de expertos hidrología	Contar con el apoyo, retroalimentación y participación de los actores representativos del componente hidrológico, en el desarrollo de la metodología de evaluación del potencial hidroenergético.	Pontificia Universidad Javeriana	21 de marzo 2014
6. Taller de presentación de resultados	Presentar los principales resultados del proyecto a los actores e instituciones de mayor influencia y conocimiento del sector energético en el país.	UPME	26 de junio de 2015

¿QUÉ APORTA?

El atlas aporta el entendimiento y acercamiento al potencial hidroenergético en Colombia y a la disponibilidad del recurso hídrico del país, teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

Modelo digital de terreno SRTM-30, que puede ser muy útil para adelantar estudios regionales en diferentes tópicos.

Es posible adelantar investigaciones para mejorar la exactitud vertical, considerando aspectos como el tipo de cobertura del suelo y la morfología del terreno, incluyendo datos recolectados de forma sistemática y ajustada a un estándar nacional. Comparando la exactitud vertical que ha sido determinada en esta investigación, contra la reportada en la



Atlas

Potencial Hidroenergético de Colombia

literatura, se puede recomendar su uso en la reproducción de la red de drenaje en escalas iguales o superiores a 1:100.000.

Bases de datos geográficas y cartografía, que representa la variabilidad del caudal medio anual a través de la red de drenaje oficial del país, teniendo como unidad de análisis un tamaño de celda de 30 m correspondiente a la resolución espacial del modelo SRTM a partir del cual se generaron estos productos.

Fue posible representar un total de 9.139 cuencas hidrográficas, cada una de ellas descrita por 20 atributos numéricos relacionados con variables topográficas e hidroclimatológicas asociadas con el comportamiento hidrológico. Estas cuencas se agruparon en 16 clúster, de la siguiente forma: siete (7) en Caribe, tres (3) en Magdalena-Cauca, dos (2) en Orinoquía, dos (2) en Amazonía y dos (2) en Pacífico. Esta agrupación facilita el desarrollo de un modelo hidrológico regional que acepta la extrapolación de datos a escala local y la estimación de caudales en sitios sin registro de información.

El modelo fue desarrollado en cada una de las regiones hidrológicas, utilizando como fuente de información principal la base de datos del estudio nacional del agua y el modelo digital de terreno SRTM- 30. En la identificación del modelo regional, fueron seleccionados los caudales medios mensuales de 472 estaciones que cubren el periodo comprendido entre enero de 1974 y diciembre de 2011. Se obtuvieron ecuaciones de regionalización con coeficientes de determinación superiores a 0,90 en cada una de las regiones hidrológicas. Las variables regresoras que se presentaron con mayor frecuencia fueron el área de la cuenca, la pendiente media de la cuenca, la precipitación, la evapotranspiración y el rendimiento hídrico.

Las regiones hidrológicas favorecen la implementación de un modelo hidrológico regional que permite describir el comportamiento del caudal a lo largo de dicha red de drenaje. Con el propósito de identificar una línea base para caracterizar

adecuadamente regiones hidrológicas homogéneas, en áreas menores de 5.000 km², los resultados de la regionalización hidrológica resultan interesantes para elaborar proyectos orientados a satisfacer las necesidades de información en la escala regional y consolidar evaluaciones regionales del agua en un marco geográfico nacional.

En el aspecto hidrológico se consignan 24 mapas asociados con dos componentes principales: i) Identificación de regiones hidrológicas, presenta información relacionada con el modelo digital del terreno, la localización de estaciones de medición de caudal, la generación de cuencas hidrográficas, la presentación de regiones hidrológicas resultantes del análisis de clúster y la re-agrupación de las regiones hidrológicas en las zonas hidrográficas definidas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) como resultado del análisis discriminante; y ii) El comportamiento del caudal a lo largo de la red de drenaje, mediante histogramas de caudal y curvas de duración de caudal.

En el aspecto relacionado con el potencial hidroenergético, se consignan 19 mapas correspondientes a: caudal Q95; caída hidráulica disponible, obtenida de la topografía del modelo de elevación digital; potencial hidroenergético medio y máximo por subzonas hidrográficas y a lo largo de la red de drenaje; y mapas que facilitan la identificación de las zonas del país con un alto potencial hidroenergético aprovechable.

Mapas con información sobre condiciones sociales, económicas y ambientales, que sirven para la toma de decisiones y para emitir conceptos técnicos relacionados con la posibilidad de realizar un aprovechamiento hidroenergético en el territorio Colombiano. Se consignan 22 mapas, que hacen referencia a variables como Parques Nacionales Naturales, conflicto de uso del suelo, Resguardos Indígenas, entre otros, esenciales para el entendimiento del contexto territorial y sobre el desarrollo de un proyecto hidroenergético.



Una metodología de participación de actores e instituciones para la selección de variables a considerar en la evaluación de proyectos hidroenergéticos.

Se implementaron tres aplicativos en donde los promotores pueden ingresar su información directamente por la web y revisar la información del país de manera cartográfica. Para la UPME se generó un aplicativo inhouse, el cual permite emitir un concepto de potencial. Estos aplicativos facilitan la sistematización de la información necesaria para evaluar proyectos hidroenergéticos.

RESULTADOS

Los resultados más sobresalientes de este proyecto pueden resumirse a continuación:

Un modelo regional basado en ecuaciones de regresión, que determina los caudales medios mensuales en diecisiete zonas hidrológicas IDEAM, cuya salida grafica permite la construcción de un raster de caudales a lo largo de la red de drenaje.

Un aplicativo para sistemas de información geográfica, que permite el cálculo automatizado de las variables hidrológicas involucradas en la evaluación del potencial hidroenergético en cualquier punto de la red de drenaje.

Mapas de la distribución del potencial hidroenergético en Colombia, a filo de agua, en cada una de las subzonas hidrográficas.

La selección de aspectos sociales, económicos y ambientales jerarquizados según su nivel de importancia para el aprovechamiento hidroenergético, en el contexto colombiano y a partir de una metodología de participación de actores e instituciones.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las regiones hidrológicas fueron identificadas haciendo uso del análisis de clúster aplicado sobre 9.139 cuencas hidrográficas que fueron

clasificadas con atributos morfológicos e hidroclimatológicos. Estos resultados presentan una perspectiva interesante como punto de partida para la extrapolación de información a cuencas hidrográficas que carecen de registros de caudales, con especial aplicación en el cálculo de caudales, desarrollo de modelos ambientales regionales y descripción de las evaluaciones regionales de agua en un contexto hidrológico.

La diferencia entre los 16 grupos no se explica exclusivamente por parámetros topográficos como la pendiente o elevación de la cuenca, aunque éstos tienden a dominar la disimilitud entre los grupos. También resultan importantes parámetros hidroclimatológicos como la escurrimiento, la precipitación y la evapotranspiración, ésta última con mayor importancia en algunas cuencas de la Orinoquía y la Amazonía. El resultado final, como un ejercicio independiente, es un buen indicador de la funcionalidad que tiene la clasificación realizada por el IDEAM en áreas, zonas y subzonas hidrográficas.

La clasificación que se realizó en el análisis de clúster y su posterior re-clasificación en zonas y subzonas hidrográficas haciendo uso del análisis discriminante, obedeció a las necesidades planteadas en el proyecto del potencial hidroenergético de Colombia, en el que se pretende maximizar el uso de la información hidroclimatológica disponible en el IDEAM.

Se reconoce que al re-clasificar las 16 regiones hidrológicas existe una pérdida de diversidad, la cual se incrementa al pasar de subzonas a zonas hidrográficas. Por esta razón, los resultados podrían servir de insumo para planificar la recopilación de información hidroclimatológica de forma tal que se satisfagan las necesidades de planificación que se derivan en las diferentes escalas de análisis.

En términos generales, el modelo propuesto para la regionalización de curvas de duración de caudal genera representaciones adecuadas para valores mayores a Q20, valor que resulta muy cercano al percentil donde se localizaría



Atlas

Potencial Hidroenergético de Colombia

el caudal medio multianual y que es empleado para el cálculo de la energía secundaria.

La energía firme se calcula con el valor definido por Q95, el cual presenta gran variación en el coeficiente de determinación. Aunque entre Q20 y Q95 se alcanzan valores del coeficiente de determinación superior a 0,602 (máximo 0,836). Es necesario indicar que el modelo no reporta los niveles de confianza necesarios para adoptar íntegramente los resultados, por lo que se recomienda que se utilicen los valores calculados entre Q20 y Q95 como indicadores de la magnitud del caudal que se espera en estos percentiles.

Como resultado del estudio se puede concluir que Colombia posee características topográficas y de caudales que le permiten garantizar un buen potencial hidroenergético a filo de agua. Característica que se manifiesta en un gran porcentaje del territorio nacional. Esta característica es más relevante actualmente por cuanto, la mayor cantidad de centrales hidroeléctricas construidas en el país funcionan con embalse.

Los sitios identificados con alto potencial hidroenergético a filo de agua, se determinaron mediante la utilización de herramientas SIG y a partir de cálculos teóricos tomando como base la información cartográfica e hidrológica disponible, por lo tanto se requerirá de un trabajo de levantamiento de información de campo y de oficina para viabilizar su aprovechamiento hidroenergético.

En este tipo de estudios es fundamental el trabajo multidisciplinario, con la finalidad de tener un enfoque sistémico sobre las intervenciones que se lleven a cabo en el territorio nacional para definir y viabilizar los aprovechamientos hidroenergéticos.

Los espacios de trabajo reportados resultaron de gran importancia para consolidar la metodología y los resultados del proyecto. A partir de estos se identificaron y jerarquizaron las variables

sociales, económicas y ambientales que fueron reportadas en el aplicativo que se diseñó para la UPME e incluidas en el atlas.

Es importante mejorar y actualizar la información social, económica y ambiental del país, teniendo en cuenta que la mayoría fue levantada en el año 2005 y puede no ser un buen referente en un territorio que se caracteriza por estar en constante cambio. Además resulta fundamental la generación de mecanismos de transferencia de información entre entidades, que permita acceder a la información de forma más eficiente y eficaz.

¿CÓMO UTILIZAR LOS MAPAS DE POTENCIAL HIDROENERGÉTICO EN COLOMBIA?

Para ilustrar sobre el uso de los mapas de potencial hidroenergético, se debe tener en cuenta lo siguiente.

La disponibilidad de información hidroclimatológica no es la apropiada para la escala de análisis que sugiere las áreas hidrográficas Orinoquía, Amazonía y Pacífico. En estas áreas se observan proyectos interesantes que deben ser evaluados con estudios hidrológicos detallados que reduzcan la incertidumbre que pueda generar el modelo regional.

Los mapas que ilustran el histograma de caudal y la curva de duración de caudal, son más una herramienta descriptiva que cuantitativa. Con su presentación se pretenden ilustrar algunos aspectos asociados con la planificación del recurso hidroenergético, permitiendo la lectura a escala nacional de cómo el régimen ambiental de caudales resulta complementario entre las diferentes áreas hidrográficas. También muestran el ajuste gráfico de las curvas regionalizadas, situación que invita a la recolección e integración de nueva información para el desarrollo de nuevas metodologías.