

UNIVERSIDAD EAN
FACULTAD DE ESTUDIOS EN AMBIENTES VIRTUALES
MAESTRÍA EN GERENCIA DE LA CADENA DE ABASTECIMIENTO

FORMULACIÓN DE UN MODELO DE PRONÓSTICO DE CAUDAL DEL RÍO OTÚN Y
SU IMPACTO EN LA GENERACIÓN DE ENERGÍA HIDRÁULICA.

TRABAJO DE GRADO-MODALIDAD TRABAJO DIRIGIDO

AUTOR
JOSÉ COLORADO MEJÍA

DIRECTOR
ADOLFO HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ
Mg. en Supply Chain and Logistics Management

PEREIRA; 2019

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía
hidráulica.

PÁGINA DE ACEPTACIÓN

DEDICATORIA

A mi hija y mi esposa por el apoyo, la comprensión y el amor el cual es la principal fuente motivadora y con la cual se logra lo que parece imposible, a mis padres y hermanos por motivarme a llegar cada vez más lejos, por ser incondicionales en cada momento de mi vida.

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía
hidráulica.

AGRADECIMIENTOS

Al director del proyecto Adolfo Hernández por su apoyo y acompañamiento facilitando todo su conocimiento y experiencia para culminar con éxito este proyecto, a la Empresa de Energía de Pereira por la disposición permanente para llevar a cabo este trabajo al interior de la empresa y a la universidad EAN por la disposición para ayudarme a culminar esta meta.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	11
1.1. Visión general	11
1.2. Formulación del problema	14
2. OBJETIVOS.....	21
2.1. General.....	21
2.2 Específicos.....	21
3. JUSTIFICACIÓN.....	22
4. MARCO TEÓRICO	25
4.1 Energía hidráulica y su importancia	25
4.2 La energía hidráulica y su uso en América Latina.....	27
4.3 Colombia y la energía Hidráulica	30
4.4 Contexto del clima y aspectos hidrográficos del sector.....	32
4.5 Caudales de río, predicciones y relación con la energía eléctrica.....	34
4.6 Pronósticos, demanda y energía.....	36
5. MARCO INSTITUCIONAL	41
5.1. Historia.....	44
6. DISEÑO METODOLÓGICO	48
7. DESARROLLO DEL TRABAJO.....	61
7.1. DIAGNÓSTICO DE LAS PLANTAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA HIDRÁULICA EN LA CIUDAD DE PEREIRA	61
7.1.1 Planta Belmonte.....	65
7.1.2 Planta Libaré.....	67
7.2. BALANCE HÍDRICO DEL SECTOR Y PRONÓSTICOS DE CONSUMO	72
8. PLAN DE INTERVENCIÓN Y PRUEBA PILOTO.....	88
8.1. PRUEBA PILOTO	92
9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	100
BIBLIOGRAFÍA	103

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Definición de variables	50
Tabla 2. Datos técnicos planta Belmonte	65
Tabla 3. Características de las unidades generadoras Belmonte	66
Tabla 4. Datos técnicos Planta Libaré	69
Tabla 5. Características de las unidades generadoras Libaré	69
Tabla 6. Comportamiento de la demanda de recurso hídrico en Pereira	74
Tabla 7. Caudales Permitidos	80
Tabla 8. Datos Caudal enero 2018	82
Tabla 9. Resumen Caudales 2018 Bocatoma Libare	83
Tabla 10. Promedios caudales por año 2014 - 2018.....	85
Tabla 11. Plan de intervención.....	88
Tabla 12. Formulación plan de intervención.....	90
Tabla 13. Series históricas de caudal río Otún.....	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Comportamiento mensual de la generación 2018 (GWh)	16
Figura 2. Comportamiento de la generación anual 2013-2018	16
Figura 3. Factor de planta	17
Figura 4. Desempeño generación Vs Capacidad Nominal PCH Libare	17
Figura 5. Desempeño generación Vs Capacidad Nominal PCH Belmonte	18
Figura 6. Comportamiento del precio en bolsa 2014-2018 (\$/Kwh)	19
Figura 7. Potencial mundial.....	26
Figura 8. Proyección fuentes de energía en el mundo 1971-2030.....	27
Figura 9. Capacidad Instalada (MW) Países Andinos	28
Figura 10. % de participación hidroeléctrica.....	29
Figura 11. Generación de energía en Colombia	31
Figura 12. Generación diaria de energía a filo de agua.	31
Figura 13. Plan Estratégico Corporativo.....	41
Figura 14. Subestación Cuba.....	44
Figura 15. Diseño Metodológico.....	49

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía
hidráulica.

Figura 16. Importancia del Río Otún	52
Figura 17. Importancia de pronóstico de caudal	52
Figura 18. Eficiencia de los procesos	53
Figura 19. Confiabilidad de información	53
Figura 20. Efectividad de los modelos actuales	54
Figura 21. Importancia de la simulación.....	54
Figura 22. Impacto de los pronósticos en la planeación.....	55
Figura 23. Pronósticos en sistemas de generación de energía.....	55
Figura 24. Impacto de los pronósticos en los indicadores económicos.....	56
Figura 25. Aporte de la información al factor ambiental y social	56
Figura 26. Apoyo de los pronósticos a los procesos	57
Figura 27. Importancia en la planeación del sector eléctrico.....	57
Figura 28. Contexto regional	63
Figura 29. Diagrama unifilar Empresa de Energía de Pereira	64
Figura 30. Planta de generación Belmonte	65
Figura 31. Planta de generación Libaré EEP	67
Figura 32. Tanque Villasantana EEP	68
Figura 33. Tablero control de caudal EEP.....	69
Figura 34. Unidades de conexión generación-Distribución Libaré	70
Figura 35. Tubería de Presión Planta Libaré.....	70
Figura 36. Históricos de Generación Plantas Belmonte y Libaré 2010 - 2016	71
Figura 37. Línea cronológica de la gestión del saneamiento del recurso hídrico en el área urbana de Pereira	72
Figura 38. Crecimiento demográfico Pereira.....	74
Figura 39. Comportamiento histórico de consumo mensual de agua	75
Figura 40. Comportamiento histórico producción de agua en Pereira	75
Figura 41. Evolución Usuarios Energía	76
Figura 42. Participación total de usuarios año 2018	76
Figura 43. Comparativo Facturación 2014 - 2018	77
Figura 44. Ventas energía Mercado No Regulado EEP	77
Figura 45. Comportamiento precio en bolsa 2014 - 2018	78

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía
hidráulica.

Figura 46. Aportes hídricos del SIN	79
Figura 47. Evolución de los embalses.....	79
Figura 48. Software usado para control de la red hidro-climatológica.....	81
Figura 49. Comportamiento enero 2018 Caudales	83
Figura 50. Comportamientos caudales 2018.....	84
Figura 51. Comportamientos caudales 2014 - 2018	85
Figura 52. Tendencia historia caudales.....	86
Figura 53. Modelo de pronóstico según análisis	96
Figura 54. Gráfica modelo de pronóstico ARIMA	97
Figura 55. Coeficientes de correlación del modelo	97
Figura 56. Análisis Caudal 2014 a 2018.....	98
Figura 57. Comportamiento Caudal 1965 - 2018	98

RESUMEN

Este trabajo de investigación pretende mostrar mediante el análisis y consulta de diferentes metodologías para el cálculo de las estimaciones de pronósticos como su aplicación en los diferentes procesos del sector eléctrico en el mundo se han convertido en una herramienta de gran importancia para la planeación en las organizaciones, en este caso se abordara la aplicación de la metodología de pronósticos ARIMA (AutoRegresive Integrated Moving Average) a la variable del caudal del río Otún en la ciudad de Pereira y su aplicación e impacto en la generación de energía hidráulica para la Empresa de Energía de Pereira, se analiza diferentes sectores de la industria empezando desde el ámbito mundial pasando por América hasta llegar a Colombia, además se revisan estadísticas de las diferentes fuentes de energía y su impacto a nivel ambiental y económico.

Mediante un diagnóstico y análisis de las condiciones actuales y estadísticas de generación de energía discriminado por plantas de generación hidráulica de la empresa se encuentra información suficiente con la cual se abordan planteamientos al respecto de los sistemas de generación de energía, así como los planes de mantenimiento que se pueden considerar para suministrar información confiable a las diferentes áreas de la compañía mejorando sus planes de compra de energía a futuro.

Con un estudio de análisis de comportamiento de caudal del río Otún con información histórica, además de contribuir a nivel empresarial para pronosticar la fuente primaria o materia prima para las unidades generadoras de energía de la empresa, también se puede generar mayor conciencia ambiental con la cual se puede determinar las proyecciones de escasez del recurso hídrico, que no solo sirve como insumo para la generación de energías limpias sino como la principal fuente abastecedora de consumo humano en la región y las variables que inciden en ella.

PALABRAS CLAVE: Caudal de río, Pronóstico, Energía hidráulica, Fuente de suministro, mercado energético, Arima.

ABSTRACT

This research work aims to show through the analysis and consultation of different methodologies for calculating forecast estimates as their application in the different processes of the electricity sector in the world have become a tool of great importance for planning in organizations. In this case, the application of the ARIMA (AutoRegresive Integrated Moving Average) forecasting methodology to the Otún river flow variable in the city of Pereira and its application and impact on the generation of hydraulic energy for the Energy Company of Pereira, different sectors of the industry are analyzed starting from the world level through America to Colombia, in addition statistics of the different energy sources and their impact on the environmental and economic level are reviewed.

Through a diagnosis and analysis of the current conditions and statistics of power generation discriminated by hydraulic generation plants of the company is sufficient information with which approaches are approached regarding the power generation systems, as well as maintenance plans which can be considered to provide reliable information to the different areas of the company, improving its future energy purchase plans.

With a study of the behavior analysis of the Otún river flow with historical information, in addition to contributing at the business level to forecast the primary source or raw material for the company's power generating units, it can also generate greater environmental awareness with which it is possible to determine the projections of scarcity of the water resource, which not only serves as an input for the generation of clean energies but also as the main source of human consumption in the region and the variables that affect it.

KEY WORDS: River flow, Forecast, Hydraulic energy, Supply source, energy market, Arima.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Visión general

La predicción de acontecimientos ha sido desde la antigüedad un fenómeno capaz de generar un carácter obsesivo en el ser humano, sin embargo, lograr una proyección de un suceso futuro requiere de un detallado análisis de datos, eventos, relaciones e información existente para intentar extrapolar futuros eventos. De acuerdo con Mejía (2005) el primer hombre en lograr realizar una predicción acertada fue Tales de Mileto quien logro predecir un eclipse total de sol, Tales usó series cronológicas de eventos registrados por los astrónomos egipcios y descubrió un patrón de tiempo, desarrollando el primer proceso de generación de pronósticos de manera sistemática y estructurada.

Este trabajo de investigación busca profundizar en la construcción de pronósticos para la generación de energía eléctrica en pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) ubicadas a filo de agua que dependen del caudal de ríos para sus procesos de generación, desde el punto de vista ambiental, social, económico y sostenible se hace necesario desarrollar estrategias que permitan anticiparse para conservar la principal fuente de suministro dentro de la cadena de generación y estimar de manera acertada las variables que inciden en la disponibilidad del recurso (Torres, Fletcher, Campbell, 2016).

Con el estado actual y diagnóstico de los procesos de generación de la Empresa de Energía de Pereira en sus dos plantas de generación PCH, con datos históricos y el análisis del caudal del río, se desarrollará un modelo con el cual se pueda lograr planear de una manera más acertada la cantidad de energía a generar en un periodo de tiempo y cuál sería la incidencia económica para la compañía basados en la disminución de las paradas no programadas de las plantas y las proyecciones de generación de energía para evitar exposición de compra en bolsa o una sobrestimación de producción para venta de energía a futuro dado que se podría conocer con menor incertidumbre la disponibilidad del recurso hídrico.

Con el estudio se identificarán las variables que afectan la disponibilidad del agua en la región y con el análisis de la prospectiva se permite enviar un mensaje de

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

reflexión sobre el cuidado y la conservación de los recursos a la vez que los sistemas de planeación a mediano y largo plazo se fortalecen con una conciencia de sostenibilidad y viabilidad económica. Actualmente la energía hidráulica es renovable ya que se genera con fuentes hídricas y contribuye a la producción de la energía eléctrica limpia, tiene las características de ser de las principales fuentes de energía primaria después de los combustibles fósiles y la energía nuclear (Revista Potencia Eléctrica, 2016).

En Colombia la generación de energía mediante el agua por medio de hidroeléctricas produce la tercera parte de la energía requerida, gracias a que el país es rico en recursos hídricos con plantas grandes y pequeñas además de nuevos proyectos hidroeléctricos que generaran más energía para cubrir la necesidad del país y la demanda de exportación (Revista Potencia Eléctrica, 2016).

De acuerdo con Hadi y Sadeghia (2017) muestran como una política muy bien guiada puede fortalecer el parque generador y conseguir la estabilidad energética, es así como se puede lograr la articulación de las proyecciones y objetivos corporativos con el balance ambiental y social generando bienestar para todos los grupos de interés.

La evolución del mercado energético colombiano se ha presentado por una combinación de factores que permitieron mejorar la confiabilidad del sistema, entre los que se incluye principalmente el clima que presenta solamente temporadas secas y lluviosas (Torres, et al., 2016).

Según el director ejecutivo de la asociación nacional de empresas generadoras (ANDEG) Alejandro Castañeda argumenta que la generación de energía mediante afluentes acuíferos en pequeñas centrales hidroeléctricas ubicadas a filo de agua que dependen del caudal del río para sus procesos de generación producen energía más limpia y con menor impacto al medio ambiente que las otras generadoras del país como las termoeléctricas las cuales además de una complicada situación financiera por la que atraviesan, principalmente las que trabajan con combustibles líquidos (Revista Semana, 2015). En datos estadísticos presentados por el boletín del SIEL 2016 (sistema de información eléctrico colombiano), el aporte energético mensualmente generado por los ríos del país es de 48.015 Gwh, y el boletín estadístico de minas y energía (2016) informa que la capacidad efectiva de generación por tipo de combustible

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

medido en Mw, hidráulica 11.512, carbón 1.369, gas 1,697, eólica 18, otras 1.940, en porcentaje hidráulica 70%, carbón 8%, gas 10%, eólica 0%, otras 12%, teniendo en cuenta estas mediciones estadísticas encontramos que la principal fuente de energía en Colombia es la hidráulica.

Este trabajo de investigación se divide en 9 capítulos, en el capítulo 1 se presenta una visión general acerca del sector eléctrico la importancia de los pronósticos o predicción de datos y la generación de energía en el entorno de sostenibilidad con respecto a la generación hidroeléctrica buscando acercar al lector al entorno económico de la energía, así mismo en este capítulo se presenta la formulación del problema de investigación en la cual se resalta teoría sobre la región y la problemática actual en cuanto a la relación entre los pronósticos y la generación de energía en plantas a filo de agua; en el capítulo 2 se presentan los objetivos general y específicos de la investigación los cuales buscan ser cumplidos en el desarrollo de todo el trabajo realizado; en el desarrollo del capitulo 3 se presenta la justificación de la investigación con la cual se pretende mostrar los aspectos que dan pie para realizar el proceso y la problemática entorno al proceso de generación de energía vista desde una perspectiva enfocada en la planeación; en el capítulo 4 se desarrolla el marco teórico con el estado del arte hablando sobre los procesos de energía desde su importancia a modo general pasando por el uso en América latina, llegando hasta su desarrollo a nivel nacional, su relación con el clima y los aspectos hidrológicos del sector hasta llegar a la demanda y predicciones; en el capítulo 5 se muestra un marco institucional con el que se buscó mostrar generalidades de la compañía donde se aplica el estudio, reseña histórica y principios que la rigen; en el capítulo 6 se presenta el diseño metodológico de la investigación herramientas usadas para realizar el estudio y soporte académico; en el capítulo 7 se relaciona el desarrollo del trabajo por medio del diagnóstico al proceso de generación de energía en ambas plantas así como relación y balance de la hidrología en el sector y su enfoque con la relación de consumo humano y eléctrico; para el capítulo 8 se muestra el plan de intervención y la realización de la prueba piloto con sus respectivos resultados y análisis con el propósito de identificar la aplicación y beneficios de los métodos de pronóstico aplicados al caudal de río; para finalizar en el capítulo 9

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

se presentan las conclusiones y recomendaciones de acuerdo a los objetivos planteados y los resultados del desarrollo del proyecto.

1.2. Formulación del problema

El río Otún es de vital importancia para el municipio de Pereira pues es la única fuente utilizada como abastecedora de agua para los diferentes usos de la zona (CARDER, 2009). El río Otún nace en el caño Alsacia, afluente de la Laguna del Otún, a una altura de 3980 msnm y desemboca en el río Cauca a los 875 msnm, en el flanco occidental de la Cordillera Central, aprovechando drenajes naturales superficiales y subterráneos de los nevados de Santa Isabel, Quindío y el páramo de Santa Rosa, localizados en el Parque Nacional Natural de los Nevados, en su trayectoria discurre por territorios de los municipios de Pereira, Santa Rosa de Cabal, Dosquebradas y Marsella. (Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC, Risaralda Características Geográficas, 2009).

El río Otún es la principal fuente abastecedora de los municipios de Pereira y Dosquebradas, tiene una función de conservación por encontrarse allí ecosistemas estratégicos y además es la principal fuente de generación de energía para las plantas hidráulicas de la empresa de energía de Pereira la cual atiende más de 155.000 usuarios en la ciudad y zonas rurales, es el río Otún fuente de abastecimiento que permite la generación de energía hidráulica acorde al caudal y la posibilidad de captación de agua (CARDER, 2009).

Según Vahos y Romero (2006), las plantas hidráulicas para generación de energía eléctrica se clasifican con respecto al control que tienen sobre el recurso primario de generación (Caudal de agua) en:

Plantas con regulación: Estas son aquellas que cuentan con embalses o represas para almacenamiento de agua, según su capacidad de almacenamiento se denominan de regulación mensual, semestral, anual o multianual. El despacho de estas plantas en un instante de tiempo dado depende de la cantidad de agua almacenada en ese instante y tienen, según su capacidad de almacenamiento, poca o ninguna dependencia del caudal de agua entrante en ese instante de tiempo.

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

Plantas sin regulación “a filo de agua”: Son aquellas que no poseen embalses para almacenamiento de agua, el despacho de estas plantas en un instante de tiempo dado depende del caudal de agua disponible en ese instante el cual es aleatorio, es decir, no se puede predecir con exactitud (Zapata, 2005).

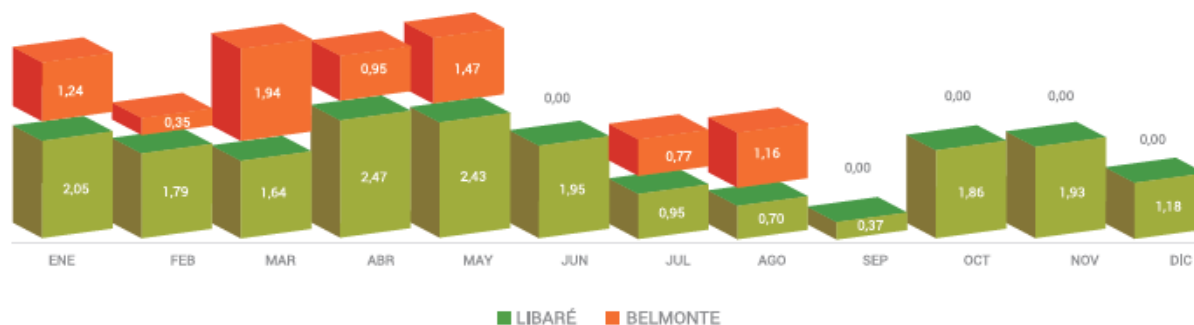
Para desarrollar un estudio de pronóstico de caudal o confiabilidad de largo plazo en un sistema con regulación anual o multianual se puede asumir total certidumbre sobre la disponibilidad del recurso hídrico para generación (Zapata y Campos, 2005), sin embargo, para las plantas a filo de agua como en este caso las dos plantas de generación de Empresa de Energía de Pereira y las plantas con poca capacidad de regulación de caudal es necesario realizar un análisis de pronósticos sobre la disponibilidad del recurso hídrico para generación.

La concesión de agua para la Planta Nuevo Libaré actualmente se encuentra regida por la Resolución 1668 de 2016, emitida por la Corporación Autónoma Regional de Risaralda CARDER, que concluye en permitir 7.200 l/s como caudal máximo para la generación en esta Pequeña Central Hidroeléctrica (PCH), siempre que se respete y garantice el caudal concesionado para consumo humano, entre las dos empresas de acueducto que se sirven de este mismo sistema (2.350 l/s), además se sigue respetando un nivel de caudal ecológico mínimo de 1.800 l/s (Informe de gestión EEP, 2018). Respecto a la Planta Belmonte, en la citada resolución emitida en el año 2016, sus condiciones permanecen intactas, pues el límite técnico impuesto por la capacidad de conducción del canal, pese a que haya un mayor caudal disponible comparado con la planta Nuevo Libaré, impide enviar más agua para la generación (Informe de gestión EEP, 2018).

Las condiciones climatológicas anuales acumuladas para el año 2018 fueron muy similares a las del año 2017, el clima presentado fue beneficioso para la generación de energía en la Pequeña Central Hidroeléctrica Nuevo Libaré, por presentarse temporadas de alta pluviosidad sobre todo en la cabecera del río Otún, lo anterior y gracias al seguimiento de los medidores de caudal llevó a que para las últimas dos vigencias se lograra el mejor nivel de generación alcanzado en los últimos nueve años para esta planta (Informe de gestión EEP, 2018).

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

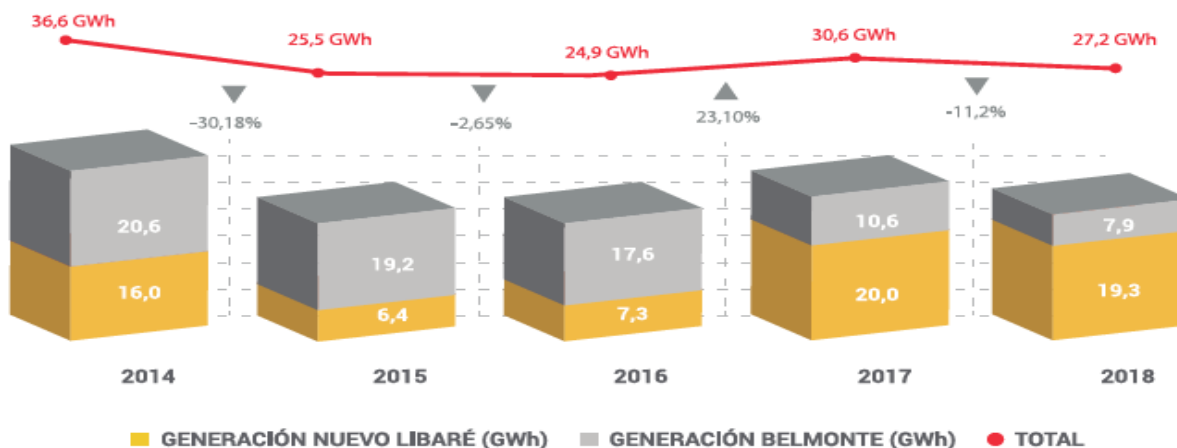
Figura 1. Comportamiento mensual de la generación 2018 (GWh)



Fuente: EEP (2018).

En la figura 1 se puede observar una gran variación en los procesos de generación de energía de las dos plantas de generación, Planta Belmonte muestra una gran irregularidad en sus índices debido a programas de mantenimiento ejecutados en las turbinas que muestran paradas de planta no planificadas durante el año, por su parte la Planta Libare muestra una variación en el proceso ocasionado por la variación del caudal y disponibilidad del recurso hídrico.

Figura 2. Comportamiento de la generación anual 2013-2018

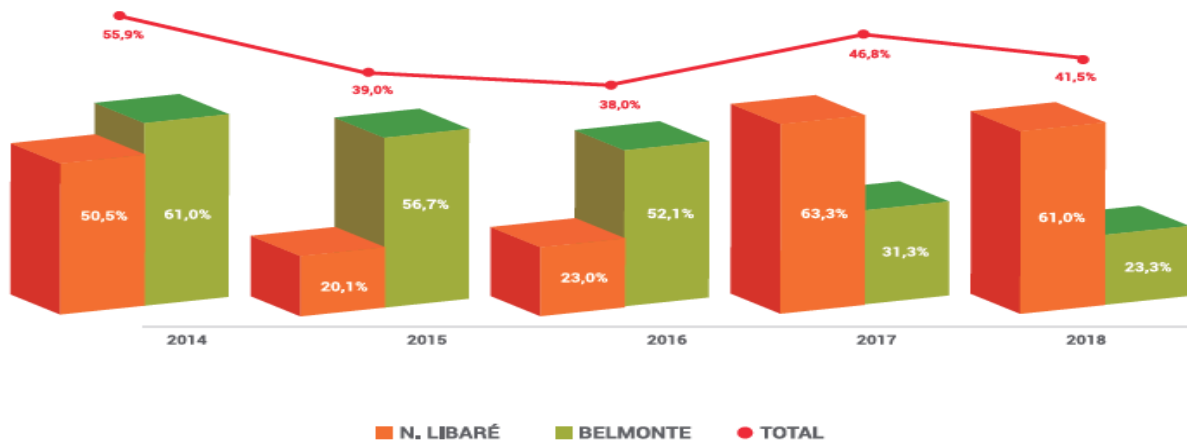


Fuente: EEP (2018).

La figura 2 muestra la variación en la energía generada por las dos plantas en los últimos 5 años, principalmente debido a la disponibilidad del recurso hídrico, debido a que un porcentaje de las utilidades de la compañía depende del proceso de generación hidráulica, esta variación afecta el margen ebitda o utilidad operativa.

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

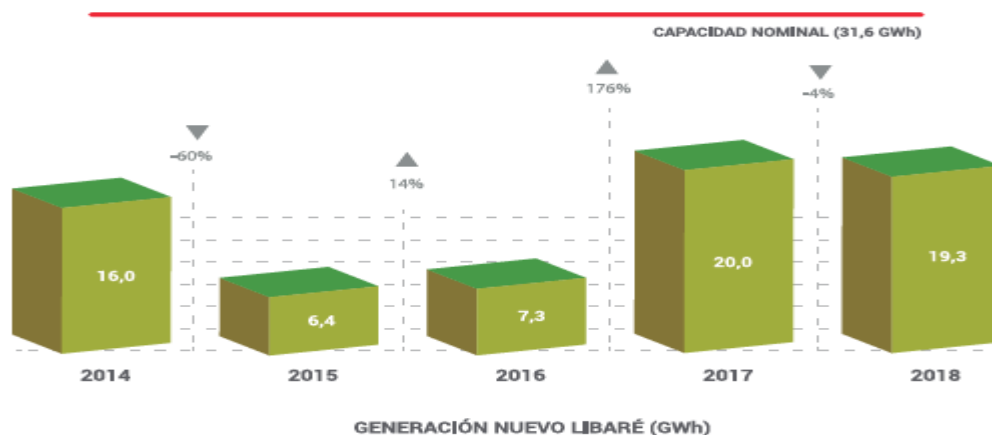
Figura 3. Factor de planta



Fuente: EEP (2018).

Acorde con la capacidad total de las plantas de generación, se realiza un análisis del factor de planta el cual se muestra en la figura 3, mostrando las posibilidades de generación según la capacidad instalada de las centrales.

Figura 4. Desempeño generación Vs Capacidad Nominal PCH Libare



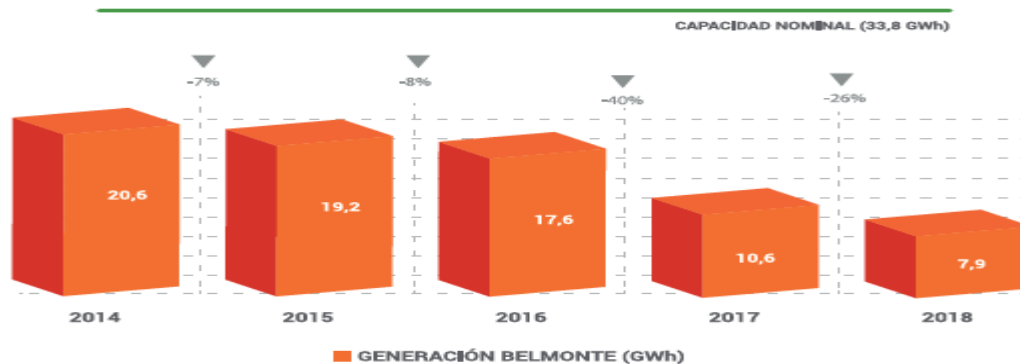
Fuente: EEP (2018).

La figura 4 nos muestra como a pesar de tener una capacidad nominal de 31,6 GWh en los últimos 5 años solo se ha logrado una generación máxima de 20,0GWh siendo esto aproximadamente el 66% de sobre la capacidad nominal en el año 2017, identificando una posibilidad de generación y eficiencia mucho mayor a la obtenida en la planta

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

Libare, se muestra que en los años 2017 y 2018 se han presentado mejores niveles de generación, sin embargo existe incertidumbre y dado la variación en el proceso.

Figura 5. Desempeño generación Vs Capacidad Nominal PCH Belmonte



Fuente: EEP (2018).

Tal como se observa en la figura 5, la planta Belmonte presenta una variación contraria a la observada en la planta Libare, esto básicamente ocurre debido a fallas presentadas en equipos relacionadas con el plan de mantenimiento y paradas de planta no programadas.

Durante el año 2018 el precio en bolsa nacional (PBNA) se mantuvo la mayor parte del año con tendencia a precios bajos comparados con los precios presentados en años anteriores, presentando un precio promedio de 116,02 \$/kWh, con un precio máximo 555,12 \$/kWh en la hora 20 del 14 de noviembre de 2018 y un precio mínimo de 61,45 \$/kWh. Cabe resaltar que en los últimos días del año el precio tuvo un incremento importante, cerrando el 31 de diciembre a 340,64 \$/kWh, lo anterior, debido a una disminución en los aportes hídricos en las principales cuencas del país durante este mes, lo cual se tradujo en un aumento en la participación de generación de plantas térmicas de carbón y gas, y adicionalmente con la expectativa de un Fenómeno del Niño para el primer cuatrimestre del año, periodo que coincide con la estacionalidad de verano en los embalses del país (Informe de gestión EEP, 2018).

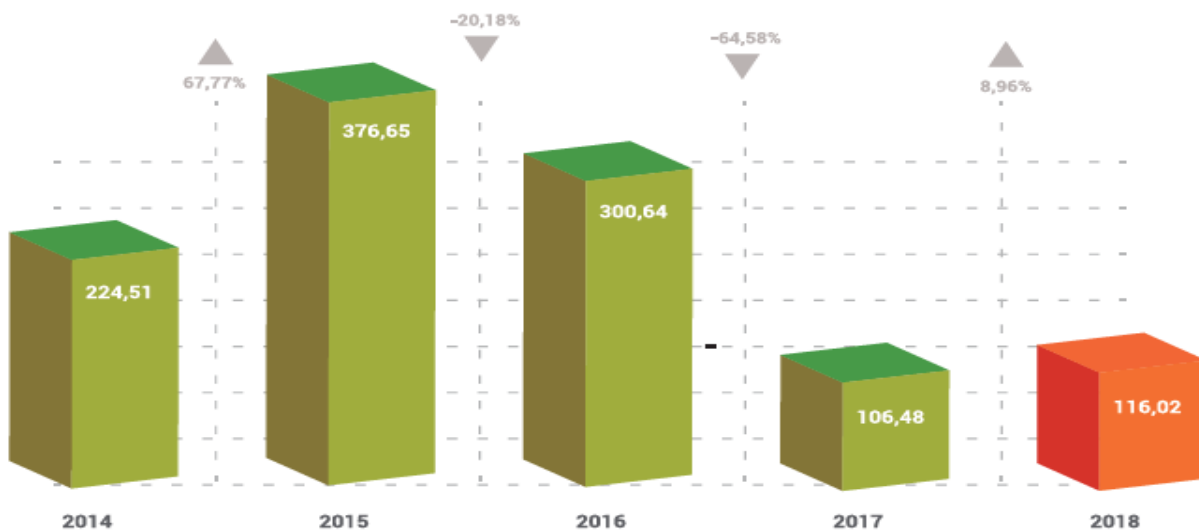
En los años 2014 a 2015 el PBNA ha presentado tendencias de precios altos debido a la disminución de los aportes hídricos y al bajo nivel de los embalses, los cuales han estado entre los más bajos en los últimos 10 años, acompañado de una

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

expectativa de Fenómeno del Niño que solo se consolidó hasta el último trimestre del año 2015 (Informe de gestión EEP, 2018).

Durante el año 2016, el PBNA presentó altas volatilidades. Para el primer cuatrimestre del año se dio una tendencia alcista debido a la ocurrencia de un Fenómeno del Niño con intensidad fuerte que venía desde finales del año 2015, esto sumado al daño ocurrido en la Central Hidroeléctrica de Guatapé que limitó en su totalidad a una de las cadenas hídricas más grandes del país, de la cual se alimenta la planta hidroeléctrica con mayor capacidad de generación, San Carlos, con 1250 MW de energía disponible. Lo anterior conllevó a que para la atención de la demanda nacional se requiriera por parte del Centro Nacional de Despacho (CND) la puesta en marcha de recursos de generación térmicos que utilizan fuentes de combustible líquidos, el recurso más costoso que tiene el Sistema Interconectado Nacional (SIN) (Informe de gestión EEP, 2018).

Figura 6. Comportamiento del precio en bolsa 2014-2018 (\$/Kwh)



Fuente: EEP (2018).

De acuerdo con la figura 6 se puede observar una variación general del precio de energía en bolsa lo cual genera incertidumbre en los procesos de generación de energía no solo en las PCH sino a nivel nacional, esto basados en que las amenazas

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

por efectos climáticos pueden ocasionar mayores niveles de generación o daños en la infraestructura que a su vez repercuten en paradas de planta, en este entendido se resalta la necesidad de análisis para obtener información futura y lograr predecir los niveles de exposición de compra de energía en la bolsa del sistema interconectado nacional.

De acuerdo a la importancia del río Otún para la región, la dependencia de sus habitantes y de la empresa por ser este la principal fuente de suministro para los procesos de generación de energía, teniendo en cuenta las características de las plantas de generación de energía sin regulación o a filo de agua así como las restricciones presentadas por la corporación autónoma con respecto al caudal ecológico del río, las variaciones mensuales y anuales en los procesos de generación así como la relación de los factores de planta y el desempeño de acuerdo con su capacidad nominal y precios de la energía en bolsa que pueden impactar el balance financiero, se plantea el siguiente interrogante, ¿Durante que horizonte de tiempo seguirá siendo viable la generación de energía hidráulica en las plantas de generación de la empresa de energía de Pereira según la incertidumbre de sus fuentes de suministro?

2. OBJETIVOS

2.1. General

Desarrollar un modelo de pronóstico de caudal de río para disminución de incertidumbre en la generación de energía hidráulica y su impacto económico en una empresa de energía.

2.2 Específicos

- ✓ Realizar diagnóstico que permita determinar la brecha o desviación entre el estado actual de los procesos de generación de energía y el impacto de los nuevos modelos.
- ✓ Analizar el funcionamiento y capacidad de generación de las plantas desde un sentido técnico acorde a los niveles históricos y actuales de caudal del río Otún.
- ✓ Simular modelos de pronóstico para determinar la confiabilidad de los sistemas de generación de energía hidráulica.
- ✓ Desarrollar un modelo y validar la viabilidad financiera y operacional de aplicación de la propuesta.

3. JUSTIFICACIÓN

La Empresa de Energía de Pereira es una compañía de carácter mixto por su composición accionaria y que presta el servicio público de energía eléctrica en la ciudad de Pereira, la energía como producto proviene de diferentes fuentes de suministro para cumplir con la demanda que requiere la ciudad, en general la compañía al igual que todos los generadores y operadores de red se encuentra conectada al sistema de transmisión nacional (STN) donde cada uno de los participantes diariamente inyectan y consumen energía según las demandas de su área de influencia, de acuerdo a esto, la capacidad de generación de las dos plantas de que dispone la compañía actualmente las cuales utilizan la captación de agua del río Otún para generación en sus turbinas escasamente abastece el 15% de la demanda de la ciudad, la energía adicional es tomada del sistema interconectado nacional el cual es operado por la compañía XM filial de ISA quien se encarga de cruzar las transacciones de energía para balance del sistema, administrando las cargas para garantizar suministro a toda la red, las compañías deben hacer contratos de compra y/o venta de energía a futuro a fin de tener cubierta su demanda y disminuir su incertidumbre o exposición a realizar transacciones de compra de energía en bolsa, las variaciones del valor del Kwh sometido a la bolsa depende de múltiples factores en el sector, ya sea por jornadas de invierno, verano, fenómeno del niño, la niña o costos de combustibles para generación térmica, por costos de generación de las diferentes fuentes o daños a infraestructura del sistema eléctrico nacional (EEP, 2017).

Actualmente la compañía cuenta con dos PCH (Pequeñas Centrales Hidroeléctricas) una llamada Libaré y la otra llamada Belmonte, la primera ubicada en el sector de la florida a inicios del Río Otún y la otra en las afueras de la ciudad en la vía a Cerritos, ambas captando agua para generación de sus sistemas directamente del río Otún en dos partes importantes y dependiendo del caudal para sus niveles de generación, de acuerdo al nivel de generación de las plantas se determina la cantidad de energía que debe tomarse de la red eléctrica a precio de bolsa o según los contratos de compra con otros generadores, los costos de generación de energía basados en las fuentes hídricas son los más competitivos en el país, lo que indica directamente que

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

cualquier Kwh tomado de la red es más costoso que el generado por las plantas propias, al contar con plantas de generación que dependen directamente del caudal del río, la incertidumbre del volumen de generación es mayor, poder contar con modelos de pronósticos acertados en los caudales lograría determinar de una manera más efectiva el nivel de exposición a bolsa, las coberturas de contratos de compra o venta, las decisiones en cuanto a otras fuentes de generación así como la viabilidad de generación hidráulica y el horizonte de tiempo hasta el cual las plantas podrían seguir captando agua del río manteniendo su caudal ecológico.

Los resultados económicos de la empresa podrían tener fuertes impactos si en un momento determinado se presentara una restricción en cuanto a la captación de agua para generación hidráulica y tuvieran que frenar las plantas de una manera imprevista o no planificada, es por ello que contar con un análisis efectivo y con un modelo de pronóstico que proyecte los niveles de caudal a largo plazo proporcionaría una herramienta técnica de simulación de la generación impactando los modelos económicos y financieros de la compañía así como decisiones en temas de innovación.

Las plantas de generación de energía hidráulica presentan paradas repentinas por efectos de las restricciones del caudal del río debido a que no se tiene conocimiento de las proyecciones de los niveles de caudal, las paradas de planta para efectos de mantenimiento no se calculan teniendo en cuenta posibles bajos niveles de caudal y su comportamiento, basados en la incertidumbre y la falta de optimización en la generación de energía se identifica una necesidad de optimización obteniendo un modelo de pronóstico o análisis de información que permita desarrollar planes de trabajo orientados a la eficiencia en la producción y planeación general del proceso, se identifica oportunidad de mejorar a través de herramientas de análisis y planeación lo cual orienta a la realización de este proyecto.

Basado en la identificación de la posibilidad de mejoramiento y optimización a nivel de la compañía, y teniendo en cuenta que el desarrollo del estudio de maestría enfocada en la cadena de suministros se observa que la fuente o materia prima requerida para la generación de energía en este caso es el agua, y que la fuente abastecedora es el río Otún el cual presenta unas limitantes o restricciones en temas ambientales y de consumo, se despierta un gran interés desde la parte académica y

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

como funcionario de la compañía se centra la atención con un enfoque en cuanto a generar conocimiento que aporte a la optimización de procesos, dado lo anteriormente relacionado se plantea la aplicación de conocimientos adquiridos en el estudio de la maestría en gerencia de cadenas de suministros en el ámbito investigativo y de aplicación de modelos de pronósticos llevándolo al sector eléctrico para realizar el trabajo de investigación y dejando un entregable útil para la empresa.

4. MARCO TEÓRICO

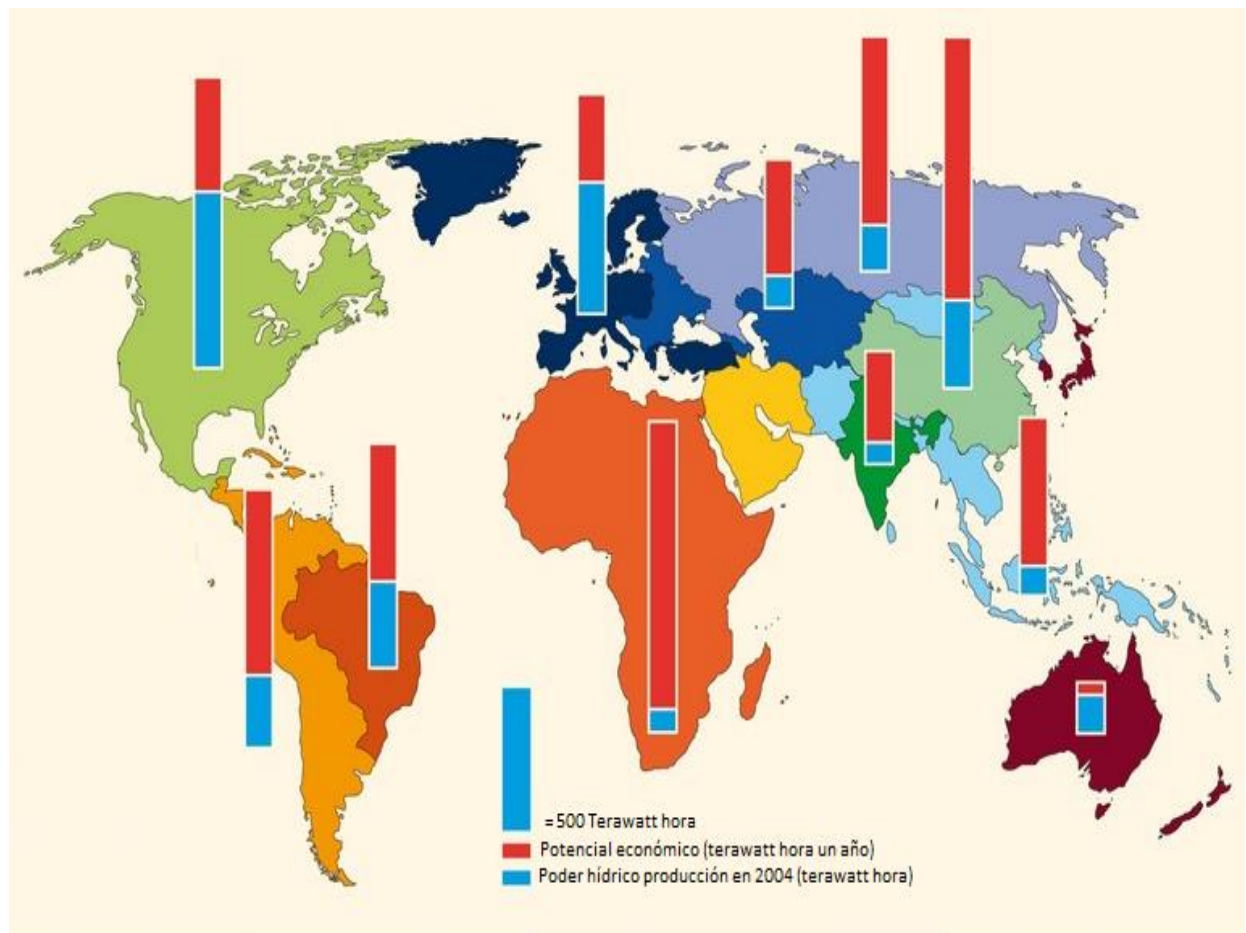
4.1 Energía hidráulica y su importancia

De acuerdo con (Sanz, 2008). La energía hidráulica ha sido una de las primeras en ser utilizadas por el hombre para generar movimiento, las primeras ruedas hidráulicas impulsadas por el peso del agua se utilizaron en Asia hace unos 2200 años. El molino griego constituyó la principal fuente de energía utilizada por los griegos y romanos, exceptuando la energía animal y la humana, esta máquina formada por un eje vertical y unas palas sumergidas en agua se utilizaba para moler grano, sin embargo, la posibilidad de emplear esclavos para esta función impidió que los molinos se extendieran por todo el imperio. La generación de electricidad y la posibilidad de transportarla a grandes distancias de forma rentable junto con el desarrollo de la turbina hidráulica permitió la reaparición de las primeras centrales hidroeléctricas, la primera central se construyó hidroeléctrica se construyó en 1880 en Northumberland, Gran Bretaña; en 1891 se construyó una central hidroeléctrica en el río Neckar a su paso por Lauffen cuya producción se usó para alimentar la Exposición Electrotécnica Internacional de Fráncfort, situada a 175 km de distancia, lo que supuso la primera transmisión de energía a gran distancia. Desde entonces y hasta ahora, la hidráulica ha sido y es una de las energías más importantes en la producción de electricidad, para ello se ha realizado un gran esfuerzo en su desarrollo, siendo la tecnología de generación eléctrica la que mejores rendimientos consigue.

En la figura 7 se muestra según la UNESCO (2017) la energía hidroeléctrica suministra cerca del 20% de la electricidad mundial, proporción que se ha mantenido estable desde la década de 1990, la utilización de fuentes de energía renovables ha aumentado en todo el mundo con avances técnicos que han permitido disminuir los costos. Dado que las fuentes de energía renovables por sí solas no serán suficientes para satisfacer el gran aumento de la demanda energética a lo largo del 2030, la extracción de combustibles fósiles y el desarrollo de la energía nuclear seguirán creciendo al mismo tiempo que lo hará el impacto sobre los recursos hídricos y el medio ambiente, el desarrollo de la energía hidroeléctrica se verá limitado por dos factores principales, el primero de ellos es el modesto potencial geofísico y espacial

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica. disponible para nuevas instalaciones de energía hidroeléctrica, el segundo abarca limitaciones tales como la capacidad de inversión (incluyendo la disponibilidad de fondos) y los impactos sociales y ambientales que conllevan las grandes represas, así como la controversia que se genera en torno a las mismas.

Figura 7. Potencial mundial

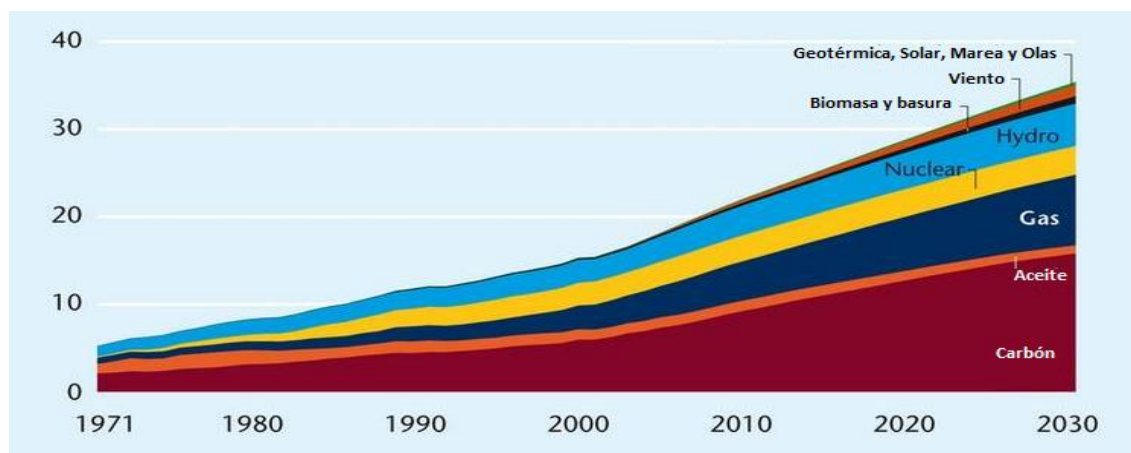


Fuente: UNESCO (2017).

El agua es un elemento esencial en el sector energético, de las fuentes de energía renovables, el agua es en la actualidad y con diferencia el recurso más utilizado para la obtención de energía eléctrica, las explotaciones hidroeléctricas no producen contaminación y el elemento fundamental, el agua, no sufre deterioro, pudiendo ser utilizada para otros fines (riegos, usos sanitarios o industriales) (Sanz, 2008).

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

Figura 8. Proyección fuentes de energía en el mundo 1971-2030.



Fuente: UNESCO (2017).

De acuerdo con la figura 8 y según la Agencia Internacional de Energía, la producción de electricidad mediante energía hidroeléctrica y otras fuentes de energías renovables crecerá a un ritmo anual del 1,7% desde el 2004 hasta el 2030, con un incremento global del 60% al llegar al año 2030.

4.2 La energía hidráulica y su uso en América Latina

De acuerdo con Alarcón (2018) en el informe “El sector hidroeléctrico en Latinoamérica: Desarrollo, potencial y perspectivas.” La energía hidroeléctrica suministra más de la mitad de la energía eléctrica de Latinoamérica y el Caribe (LAC), convirtiendo a la matriz eléctrica de esta región en la más verde del planeta. La hidroelectricidad es una tecnología madura, confiable y de bajo costo. La posibilidad de almacenamiento y la capacidad de rápida respuesta son especialmente valoradas para hacer frente a las fluctuaciones estacionales en la demanda eléctrica, y para balancear las oscilaciones de fuentes de generación intermitentes (como la energía eólica y solar). Además de proveer energía renovable, los proyectos hidroeléctricos proporcionan otros beneficios como control de inundaciones, agua para riego, abastecimiento de agua en zonas urbanas, transporte fluvial y creación de empleo.

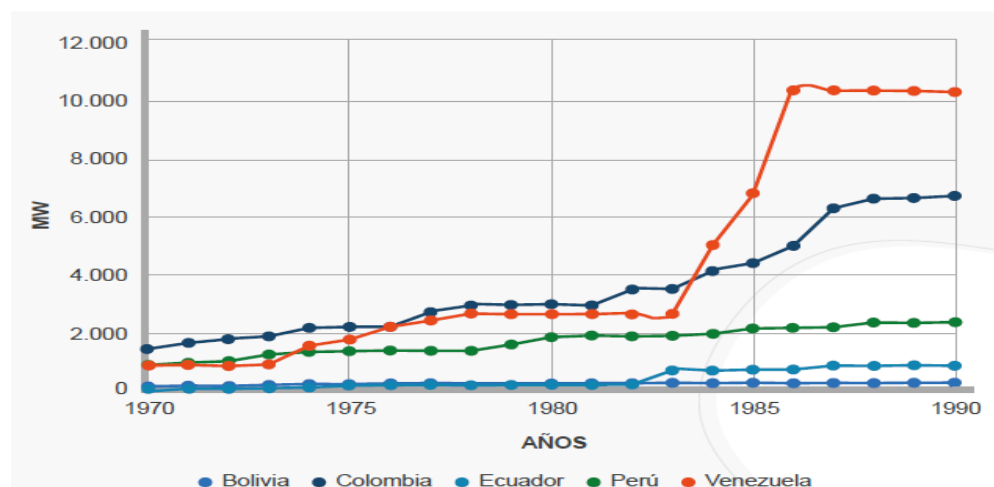
El desarrollo económico de Latinoamérica está ligado a la hidroelectricidad. El amplio potencial hidroeléctrico latinoamericano comenzó a ser explotado a fines del

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

siglo XIX y, a partir de ese momento, ese aprovechamiento fomentó el establecimiento de empresas eléctricas, la extensión de los sistemas de transmisión, y la creación de capacidad técnica local. Actualmente, la hidroelectricidad aún se presenta como una de las alternativas para sustentar las necesidades de energía en las próximas décadas. Considerando que existe aún un vasto potencial hidroeléctrico no explotado, estimado en varias centenas de Giga-watts (GW), la mayor parte de los países de la región incluye la hidroelectricidad en sus planes energéticos, como una alternativa costo-efectiva para cubrir el crecimiento de la demanda, particularmente considerando la posibilidad de proyectos multipropósito (Alarcón, 2018).

El 2015 la hidroelectricidad generó 52% de la energía eléctrica de LAC, y la capacidad instalada hidroeléctrica representó 47% de la capacidad de generación total en la región. Estas cifras están muy por encima del porcentaje de participación de la hidroelectricidad en la matriz eléctrica de otras regiones 2 y del promedio mundial (16,4% de la energía generada a nivel mundial fue hidroeléctrica en 2016), lo que ejemplifica claramente la importancia de este recurso para el desarrollo del sector eléctrico y de la economía en LAC. Al 2015, LAC tenía 15% de la capacidad instalada hidroeléctrica del mundo, con poco más del 8% de la población mundial. Sin embargo, y como puede esperarse, la evolución de la generación hidroeléctrica no ha sido uniforme entre los países de la región, ni a lo largo de los años (Alarcón, 2018).

Figura 9. Capacidad Instalada (MW) Países Andinos

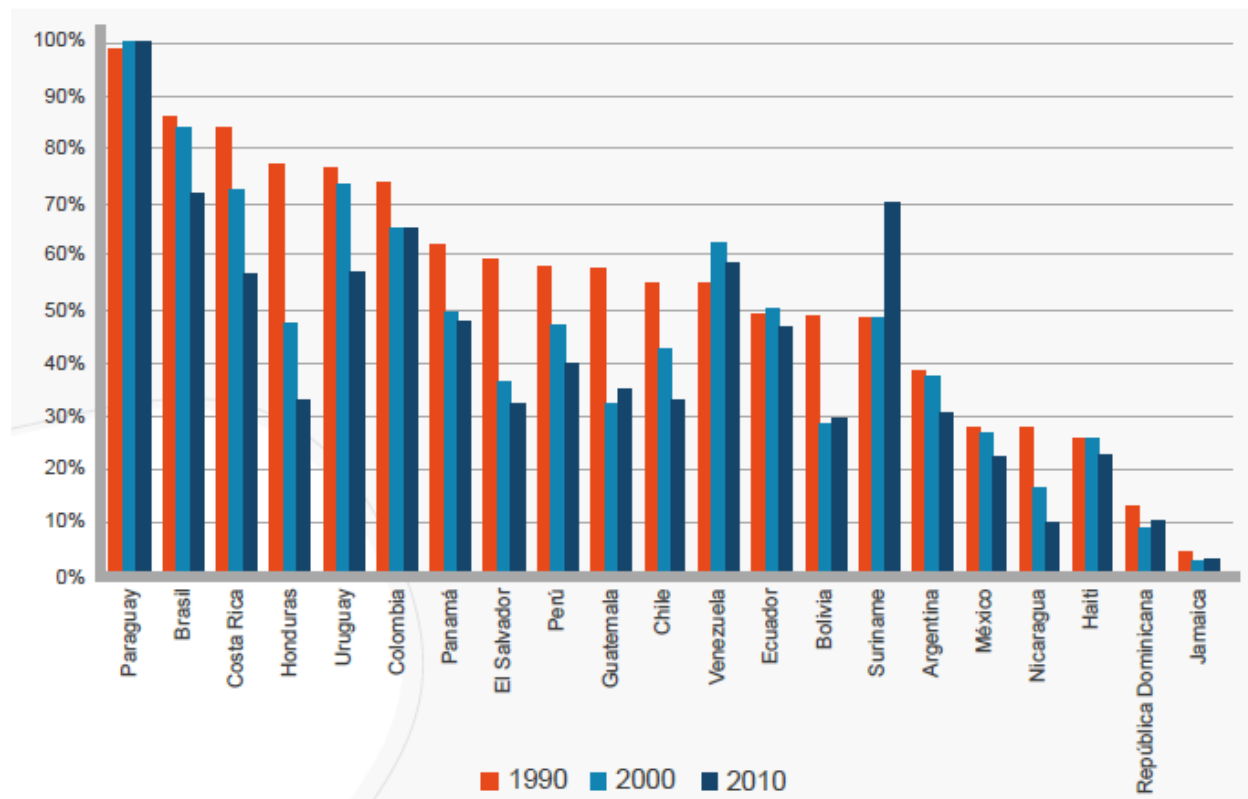


Fuente: Banco Interamericano de desarrollo (2018).

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

De acuerdo con la figura 9 vemos que la capacidad instalada de Colombia y Venezuela en energía hidráulica es bastante alto comparado con Perú, Ecuador y Bolivia, lo que indica una gran posibilidad en términos de generación de energía limpia a base de agua, esto agrega importancia al mercado eléctrico actual y las necesidades de previsión con otros escenarios.

Figura 10. % de participación hidroeléctrica



Fuente: Banco Interamericano de desarrollo (2018).

De acuerdo con la figura 10 podemos observar cómo en estos escenarios de tiempo cada 10 años la participación hidroeléctrica va cambiando a medida que nuevas tecnologías son desarrolladas y de acuerdo con la capacidad hídrica de cada región, esto mostrando la importancia del recurso hídrico y las fuentes de generación de energía para los distintos países.

4.3 Colombia y la energía Hidráulica

El aprovechamiento del agua como fuente de energía es muy antiguo. Antes de la Era Cristiana, se utilizaron los cursos de agua para mover ruedas de molinos o elevar el agua para el riego. Sin embargo, recién a fines del siglo XIX, comenzó a usarse la energía del agua para generar electricidad. En la actualidad, alrededor del 20% de la electricidad del mundo se genera a partir de grandes centrales relacionadas a embalses de agua (Uche, 2013).

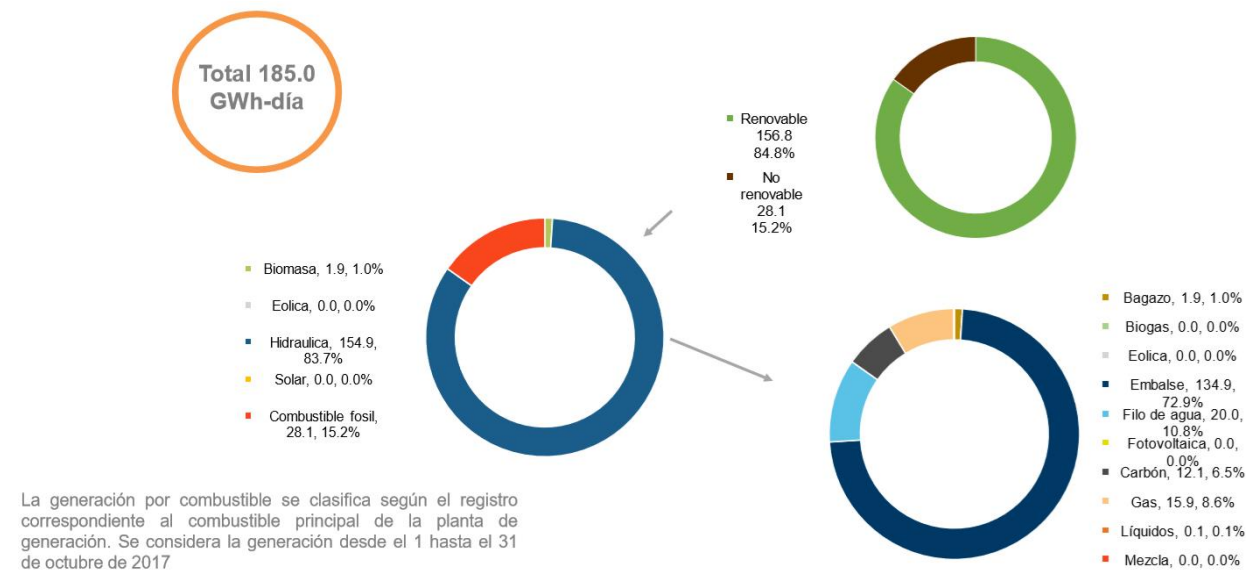
La energía de estas centrales proviene de la conversión de la energía potencial que se encuentra acumulada en el agua al existir una diferencia de altura entre el nivel superficial y la base de la presa donde se encuentra ubicada la central. El agua almacenada se hace pasar por unos conductos transformando así la energía potencial en energía cinética con la que el agua consigue alcanzar velocidades muy grandes para ser capaz de mover las turbinas que se encuentran situadas en la presa (INGEOMINAS, 2003).

Las turbinas de la central tendrán un tamaño que dependerán del caudal al que vayan a ser expuestas y del agua que la presa sea capaz de hacer pasar por los conductos para hacerlas girar. De acuerdo con el tamaño de las turbinas, al estar conectadas a un generador serán capaces de producir cierta cantidad de energía. En las centrales hidroeléctricas pequeñas, aún no existe una clasificación mundialmente aceptada respecto a sus nombres e intervalos de potencia. En algunos lugares una “central pequeña” puede ser aquella cuya potencia instalada no sobrepase los 10 MW, en unos casos esta denominación se utiliza para centrales que van de un orden de los 2 MW a los 5 MW. Otras denominaciones empleadas son “mini” y “micro” centrales, designando las que tienen 1 MW o menos de potencia (Amaya, Hernandez, Villegas, 2009).

Hay proyectos en distintos países de todo el mundo que plantean la utilización de micro centrales hidroeléctricas para solucionar problemas de sitios alejados o con problemas para transportar la energía. Otros lo ven también con el propósito de aprovechar los caudales que están alrededor y del cual su energía se ve desaprovechada (Marin, 2007).

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

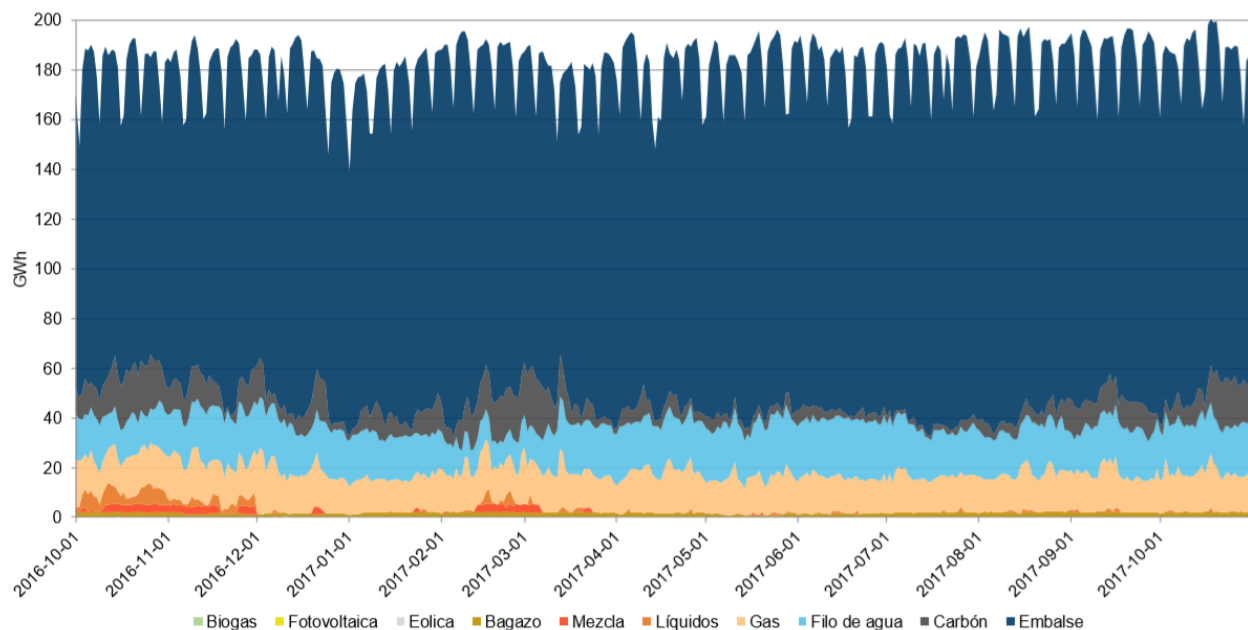
Figura 11. Generación de energía en Colombia



Fuente: www.xm.com.co (2018).

En la figura 11 se muestra la generación de energía en el país y la participación de la energía hidráulica con un porcentaje del 83.7% sobre el total de generación,

Figura 12. Generación diaria de energía a filo de agua.



Fuente: www.xm.com.co (2018)

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

En la figura 12 se muestra el equivalente de la generación de energía correspondiente a la generación de centrales a filo de agua y la generación por medio de otros sistemas mostrando que en promedio 20 GWh corresponden a generación a filo de agua.

4.4 Contexto del clima y aspectos hidrográficos del sector

Teniendo presente que los ríos y en general las corrientes hídricas superficiales son sistemas altamente dinámicos y complejos en los cuales sus características hidrológicas, hidráulicas, sedimentológicas, morfológicas y de calidad de sus aguas varían tanto temporal como espacialmente, es necesario su continuo estudio, máxime que cualquier intervención natural o artificial que se realice en estos origina cambios, tanto localmente como aguas arriba y aguas abajo del sector intervenido (Holguín, Polimeni, Cruz, 2007).

La Universidad Nacional sede Medellín y Aguas y Aguas de Pereira, en 2005 realizaron el Balance Hídrico en la Subregión 1 del Risaralda el cual muestra un índice de escases medio en la fuente de abastecimiento del área urbana de la ciudad y luego en la actualización en el 2009, se garantiza la oferta hídrica para la ciudad en el largo plazo (García, Pinzón, Erazo, 2014),

Investigadores de la Universidad Nacional Autónoma de México y la Universidad Autónoma de Tamaulipas en 2009, para analizar la relación de oferta/demanda del recurso hídrico en la cuenca del Sinú, Colombia, teniendo en cuenta los valores actuales y proyectados a los años 2015 y 2025 por el Instituto de Hidrología, Meteorología y de Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM). El trabajo denominado “Analysis of the water supply-demand relationship in the Sinú - Caribe basin, Colombia, under different climate change scenarios” incluye los posibles cambios en la relación oferta/demanda, debidos al cambio climático, para analizar y simular sistemas del agua y orientar políticas de manejo (García et al, 2014).

Los estudios previos a la materialización de las obras de infraestructura y otras gestiones sociales y económicas del Plan de Saneamiento Hídrico de Pereira prepararon el terreno frente a algunas proyecciones y expectativas, y dieron vía libre a su desarrollo; de la misma manera con la normatividad actual en el Ordenamiento del

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

Recurso Hídrico (Decreto 3930 de 2010), basado en esos estudios se reconoce que hay deterioro de la calidad de agua disponible en la región. Con lo anterior se argumenta que hay en ejecución acciones para la restauración ecológica de las corrientes hídricas y con los modelos de pronósticos se busca analizar sus efectos en el mediano plazo.

CORPOCALDAS y la Universidad Tecnológica de Pereira con el Grupo de Investigación Ecología, Ingeniería y Sociedad, en 2010, para la “Definición del Índice de Escasez e implementación del modelo de Gestión integral del recurso hídrico en la cuenca alta del río Chinchiná”, muestra la oferta limitada del recurso en el área de estudio alcanzando un máximo de escasez, esto evidencia que se debe replantear la distribución de caudales para la reglamentación del recurso hídrico.

CARDER y la Universidad Tecnológica de Pereira con el Grupo de Investigación Ecología, Ingeniería y Sociedad, entre 2008 y 2010, en el estudio denominado “Aplicación del Software WEAP para la Gestión Integral del Recurso Hídrico en las cuencas de los ríos Barbas, Cestillal y Consota¹¹”, estimando la oferta hídrica se determina la disponibilidad del recurso teniendo en cuenta los caudales ecológicos y la calidad del agua, el estudio declaró agotados algunos tramos de los ríos Barbas y Cestillal, con esto evito que se otorguen nuevas concesiones o incremento de los volúmenes de agua actualmente distribuidos a los operadores o empresas prestadoras del servicio público de acueducto por parte de la autoridad ambiental competente (García et al, 2014).

El municipio de Pereira en general cuenta con variedad de pisos térmicos que va desde las nieves perpetuas en el Nevado de Santa Isabel a 5.200 msnm, hasta los 900 msnm en el río Cauca, encontrando que el clima en el territorio de Pereira se distribuye en: 9,9 % Cálido, 60,7 % Clima Medio, 11,5% Frío y, 17,7% Páramo.

Según García et al (2014) la precipitación media anual en el municipio es de 2.750 mm con un régimen de lluvias de distribución bimodal representados en dos periodos lluviosos y dos periodos secos o de lluvias bajas. Los periodos lluviosos ocurren con posterioridad a los equinoccios y corresponden a los meses de abril a mayo, con lluvias máximas en mayo (294 mm en promedio); y de octubre a noviembre, cuyo extremo máximo ocurre en octubre (promedio de 390 mm). Por su parte, los

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

periodos secos corresponden a los meses de enero a febrero (177 mm) y de julio a agosto (184 mm).

Según estudio realizado por García et al (2014), La red de suministro de agua potable en el AMCO es manejada por diferentes empresas de servicios públicos, y cada uno de los municipios que pertenecen al centro metropolitano se abastece de diferentes fuentes superficiales. La principal fuente de abastecimiento de agua superficial del área urbana del municipio de Pereira es el río Otún, con un caudal promedio de 12,19 m³/s, de los cuales se captan 2 m³/s con destino al acueducto de Pereira (Cárdenas, 2013). Esta cuenca atiende las demandas presentes y se visiona en la planificación de largo plazo, como la única alternativa segura de agua para la ciudad de Pereira, este caudal de río también proporciona la fuente de suministro para generación de energía de las plantas hidroeléctricas quienes deben garantizar el caudal ecológico mínimo del río.

Por otra parte, el área urbana del municipio de Dosquebradas no se abastece de fuentes superficiales propias de su territorio ya que no garantizan cantidad y calidad, por lo tanto, importan agua de territorios vecinos como lo son el río Campoalegre del municipio de Santa Rosa de Cabal y el río Otún del municipio de Pereira. Con la compra de agua en bloque Dosquebradas abastece el 70% de su población y el otro 30% de sus habitantes solucionan su abastecimiento a través de acueductos de tipo comunitarios y privados (Quintana, 2009).

4.5 Caudales de río, predicciones y relación con la energía eléctrica

Trabajar en la predicción de caudales de río permanece como punto importante, dado sus aplicaciones en la generación de energía eléctrica, en agricultura y todo lo relacionado con la vida.

Investigaciones reportadas en Poveda (2004); evidencian como los fenómenos macro climáticos están fuertemente asociados a la dinámica de los caudales; lo que motiva a estudiar cómo estos, inciden en la climatología de nuestro país. Para ello se han utilizado técnicas lineales y no lineales, con el fin de determinar las conexiones existentes entre los fenómenos macro climáticos asociados a la variabilidad climática.

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

Actualmente existen diversas metodologías para estimar condiciones hidrológicas futuras, las cuales relacionan variables meteorológicas con hidrológicas o hidrológicas entre sí. Diversas técnicas de pronóstico, tanto técnicas empíricas, estadísticas como los métodos dinámicos son empleados en el pronóstico climático a niveles regionales y nacionales (OMM, 2003). Estas metodologías incluyen análisis de patrones de circulación atmosférica general; métodos análogos, series de tiempo, correlación, regresión lineal múltiple y análisis de anomalías climáticas asociadas a métodos dinámicos, modelos híbridos, entre otros.

Según el hidrólogo Germán Poveda Jaramillo (2004), el cambio climático y la deforestación de bosques han ocasionado en los últimos 40 años una reducción en el caudal de los ríos colombianos entre el 10 y 15%.

El profesor Poveda de la facultad de Minas de la Universidad Nacional de Medellín señaló que esto podría generar consecuencias en el transporte fluvial, la producción de energía eléctrica, el riego, el suministro de agua para poblaciones y la salud.

Así mismo, indicó que este fenómeno genera derretimiento de los glaciares tropicales, aumento en el nivel del mar que erosiona e inunda sistemas costeros, afectación a la integridad de los ecosistemas de páramos y un cambio en los regímenes de lluvias. Respecto a los glaciares tropicales, advierte que dentro de dos o tres décadas el país ya no contará con estos lo cual afectaría el suministro de agua para las regiones de los altos andes (El espectador, 2015).

Según asafu, (2009), en hidrología se han utilizado tradicionalmente modelos lineales determinísticos y estocásticos univariados y multivariados en la predicción de series de las variables fundamentales, especialmente de caudales. Es por lo tanto necesario describir algunos antecedentes que fundamentan las ideas de asociar modelos determinísticos y estocásticos con el propósito de mejorar la representación de los procesos y de estudiar usando experimentación numérica, la capacidad predictiva del modelo determinístico.

El desarrollo de pronósticos para el caudal de los ríos es útil para reducir esta incertidumbre asociada a la gestión y conservación del agua. El pronóstico de

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

caudales es, por tanto, una de las medidas de gestión usadas para lidiar con la incertidumbre del clima.

Según Ahumada, (2015) en su columna del diario El tiempo, las centrales hidroeléctricas al filo de agua tienen un potencial que es casi 6 veces el nivel actual de producción, es decir, las centrales sin embalse que dependen del caudal de río son el futuro de la energía en el país, mientras las autoridades del sector eléctrico buscan la manera de darles mayor participación a los proyectos de generación de energía con carbón y las empresas del sector, como el grupo italiano Enel, dueño de la hidroeléctrica El Quimbo, creen que la era de las grandes hidroeléctricas finalizó por los altos costos y riesgos (ambientales y sociales), el futuro del abastecimiento energético en el largo plazo sigue estando en el agua, pero de otra forma.

De acuerdo con Ahumada (2015) el nuevo escenario plantea, según un documento de la Unidad de Planeación Minero Energética (Upme), que mientras hoy la capacidad de generación hidráulica del país es de unos 10 gigavatios, hay un potencial de otros 56.189 megavatios (56 gigavatios) nuevos solamente en proyectos de generación que no necesitan embalse, conocidos como centrales hidroeléctricas a filo de agua.

Son plantas más pequeñas, que requieren una inversión mucho menor que la de una hidroeléctrica como Ituango, El Quimbo o Sogamoso y que se pueden ubicar en aguas con menor caudal y construirse en menor tiempo.

Estas centrales se construyen en los lugares en que la energía hidráulica debe emplearse en el instante en que se dispone de ella para accionar las turbinas hidráulicas. No cuentan con reserva de agua, oscilando el caudal suministrado según la época del año y en temporadas de precipitaciones abundantes desarrolla su potencia máxima y dejan pasar el agua excedente, mientras que en la temporada seca la potencia disminuye, llegando a ser casi nula en algunos ríos en la época del estío.

4.6 Pronósticos, demanda y energía

Para referirnos al tema a desarrollar en este aparte, vamos a tener en cuenta la siguiente frase, “La predicción de la demanda es un problema de gran importancia para

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

el sector eléctrico, ya que a partir de sus resultados los agentes del mercado de energía toman las decisiones más adecuadas para su labor” (Rueda, 2011). Es en este sentido que se da relevancia a la predicción de demanda en este sector, aunque se podría relacionar que en cualquier mercado las decisiones más asertivas se pueden tomar a partir de la proyección de información con menor incertidumbre, para este caso es necesario tener presente que el mercado de energía se basa en las predicciones de la demanda para realizar las negociaciones y cubrir su mercado objetivo a mediano y largo plazo.

Cuando se trata de elaborar una predicción es demasiado interesante observar los múltiples factores que pueden cambiar nuestros pronósticos y para este caso revisaremos el siguiente concepto de los modelos de regresión múltiple “El pronóstico con los métodos de series de tiempo es cómo manejar un automóvil por la autopista con el parabrisas tapado. Todo estaría bien si estuviera conduciendo en un desierto sin curvas en el camino. Sin embargo, si maneja en una autopista normal, tarde o temprano tendrá que dar vuelta, cuando lo haga no verá la curva hasta que esté en el espejo retrovisor, en ese momento será demasiado tarde para reaccionar (Holton & Keating, 2007).

En Colombia (Murillo et al., 2003) elaboraron una investigación que tuvo como objetivo pronosticar la demanda de energía eléctrica haciendo uso de modelos ARIMA; se usó una base datos históricos suministrada por la Empresa de Energía de Pereira que van desde el primero de enero de 2001 hasta el 31 de diciembre de 2001. El modelo utilizado, después de realizar las pruebas pertinentes fue un SARIMA (1,0,0) (2,1,0), los errores producidos por el modelo cumplen con el supuesto de normalidad que permite confiar en la bondad de ajuste.

En (Barrientos et al., 2007) con el fin de obtener pronósticos, se modeló la demanda diaria de energía eléctrica en el valle del Cauca. Los datos van desde enero de 2001 hasta noviembre del 2004 a frecuencia horaria. Se usó modelos spline y para fines de comparación se ajustó un modelo ARIMA. Los resultados muestran que se da una fuerte relación entre el PIB y la demanda de energía eléctrica, se concluyó que los modelos que usan tasa de crecimiento en las variables explicativas son adecuados para la proyección de la demanda. En el trabajo de Zapata (2011) se observa que,

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

frente a variaciones en la tarifa de electricidad, los usuarios reducen el consumo de energía. Asimismo, en el trabajo de Mendoza (2010) se muestra que ante alzas en el ingreso se tiende a aumentar el consumo, con mayor intensidad en los estratos bajos, siendo casi inalterable en estratos altos.

En la investigación de Eras (2012) se nos informa que los recursos fósiles representan un 52 por ciento de la potencia efectiva para el servicio eléctrico, lo que indica que existe un elevado porcentaje de energía térmica el cual genera una mayor emisión de CO₂. El aumento en la generación hidráulica del país es de gran provecho para cubrir las necesidades del servicio eléctrico para la población demandante, disminuir la dependencia energética de otros países, reducir el consumo de combustible fósil, disminuir emisiones de gases de invernadero e incluso aumentar la generación de empleo.

Actualmente, la modelación de sistemas y la medición son las dos principales tecnologías empleadas para analizar, predecir, y gestionar las complejas características y comportamientos del recurso hídrico en el ecosistema de una cuenca hidrográfica (Ouyang, 2008).

En la investigación de Dergiades y Tsoulfidis (2008) se estudió la estabilidad de las variables en la función de demanda de electricidad, la cual depende negativamente del precio de la electricidad y positivamente del ingreso per cápita, precio del petróleo y stock de casas. La variable número de casa es tomada como variable proxy del número de electrodoméstico, debido al supuesto que a mediados de los sesenta los equipos usados en el hogar consumían electricidad. Mediante un modelo autorregresivo y de retardos distribuidos con enfoque de cointegración se analizó la naturaleza de la demanda ante variaciones significativas de precios.

En Asafu y Adjaye (2000) sugieren que hay una correlación positiva entre la demanda de energía eléctrica y la evolución del PIB para India, Indonesia, Filipinas y Tailandia. Pero, sin embargo, debemos citar el trabajo de Belke (2010), donde se observa que existe una neutralidad entre estas variables para 25 países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico.

La predicción de la demanda de electricidad se realiza para horizontes de corto, mediano y largo plazo (Gutiérrez, 2003). El corto plazo corresponde a la predicción en

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

tiempo real para la hora siguiente y con un horizonte de hasta una semana hacia delante, el pronóstico se basa en los datos históricos de demanda diaria y factores climáticos. El mediano plazo corresponde al pronóstico mensual con un horizonte de hasta un año a partir de la demanda histórica de electricidad, y la predicción de algunas variables explicativas como el crecimiento de la economía o el clima. Finalmente, el largo plazo abarca un horizonte de uno hasta diez años, la predicción de la demanda en el largo plazo es usada para la planeación y expansión de la generación y de la transmisión, el precio de la electricidad, el precio de productos sustitutos, la evolución demográfica e indicadores económicos, entre otros. Según Medina y Garcia (2005) para los generadores el pronóstico de demanda en el corto plazo permite definir la cantidad de energía a generar para el día siguiente, programar la operación y fijar el precio de oferta de la electricidad en el mercado.

En el mediano plazo es un insumo fundamental para la definición de planes de mercadeo y ventas en contratos, y análisis de la evolución del mercado. En el largo plazo, permite detectar los periodos para los cuales existen excesos y faltantes de capacidad de generación con el fin de planificar las inversiones en la expansión del sistema de generación y adoptar medidas de conservación de la energía; en el largo plazo, este es un problema fundamental debido a que la construcción de una nueva planta generadora puede tomar varios años tal como lo menciona (Labys, 2003), afectando la confiabilidad del suministro de energía eléctrica.

Los costos de generación de energía basados en las fuentes hídricas son los más competitivos en el país al contar con plantas de generación que dependen directamente del caudal del río, la incertidumbre del volumen de generación es mayor, (Zapata C. J, Rengifo E. López J, 2006) poder contar con modelos de pronósticos para determinar los niveles de caudal lograría determinar de una manera más efectiva el nivel de exposición a bolsa, las coberturas de contratos de compra o venta, las decisiones en cuanto a otras fuentes de generación así como la viabilidad de generación hidráulica y el horizonte de tiempo hasta el cual las plantas podrían seguir captando agua del río manteniendo su caudal ecológico.

Acorde con lo anterior vemos que en el mercado eléctrico se aplica con frecuencia modelos ARIMA (Box-Jenkins), en este sentido la afirmación de (Holton &

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

Keating, 2007) sobre el uso de modelos ARIMA la cual tiene algunas ventajas sobre otros métodos de series de tiempo tales como la suavización exponencial, la descomposición en series de tiempo y el análisis de tendencia simple. La metodología de Box-Jenkins determina una gran cantidad de información a partir de la serie de tiempo. En vez de seleccionar a priori una tendencia simple en el tiempo o un método de suavización exponencial, por ejemplo, como el modelo correcto, la metodología de Box-Jenkins incluye un proceso que permite examinar una gran variedad de modelos en la búsqueda del que es el correcto. Esta sola característica de “terminal abierta” explica su atractivo para muchos pronosticadores; para Zapata (2011) las predicciones y modelos de pronóstico representan una fuente importante en la planeación así mismo como el modelo que se utilice, acorde con Gutiérrez (2003) los modelos ARIMA son ampliamente aplicados dado su relación con las variables del mercado eléctrico en el cual los componentes del análisis sumado a las herramientas estadísticas para determinar el comportamiento y margen de error del pronóstico sirven para la realización de una prueba piloto que se aproxime a un modelo que permita observar no solo los comportamientos de la información histórica sino una estimación que pueda apoye como sustento para planeación a mediano plazo para la compañía.

5. MARCO INSTITUCIONAL

Energía de Pereira es una empresa de energía, no solo por estar dedicada a generar, distribuir y comercializar energía, sino también por ser una organización dinámica, progresista, direccionada al mejoramiento continuo de sus actividades.

Entre los Grupos de Interés se encuentran: comunidad en general, colaboradores, proveedores, administradores, accionistas, y los usuarios del servicio.

Energía de Pereira, se enfoca de manera continua y sostenible en aumentar sus ingresos y resultados a través de la consolidación de nuevos negocios, de la mejora continua y de la efectividad en sus procesos para cumplir con su compromiso social de ser dinamizadora del mejoramiento de su entorno social y de las condiciones de sus grupos de Interés.

Figura 13. Plan Estratégico Corporativo



Fuente: EEP (2019).

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

Misión

Somos una empresa de y para los pereiranos, que presta el servicio de energía eléctrica en forma continua y eficiente, generando desarrollo económico, social y ambiental para todos sus grupos de interés.

Visión

Ser la mejor empresa pereirana para el 2020.

Objetivo Estratégico

- **Perspectiva financiera**
Crear valor económico para los accionistas
- **Perspectiva clientes**
Aumentar la satisfacción de los usuarios
- **Perspectiva procesos**
 - Mejorar la calidad del servicio prestado
 - Optimizar la gestión de los procesos
- **Perspectiva aprendizaje y crecimiento**
Fortalecer el clima organizacional y el desarrollo integral del talento humano.

PRINCÍPIOS ESTRATÉGICOS

- **Excelencia Empresarial:** El fin de la Empresa de Energía de Pereira S.A ESP, es brindar un servicio que satisfaga las necesidades de sus diferentes grupos de interés, generando valor para cada uno de ellos y promoviendo un óptimo desempeño individual y empresarial, apoyada en la innovación y el mejoramiento continuo de los procesos, fomentando un aprendizaje permanente y actitud positiva frente a los cambios.
- **Responsabilidad Social Empresarial:** La Empresa de Energía de Pereira se compromete a impactar de manera positiva a sus grupos de interés a

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

través de un desarrollo sostenible, enmarcado en el uso responsable de los recursos que permitan un Desarrollo Social, Económico y Ambiental.

- **Legalidad:** La empresa rechaza cada acto de corrupción e inmoralidad en su quehacer, comunicando asertivamente sus políticas y procedimientos y fortaleciendo así la confianza de la organización y por la organización.

VALORES CORPORATIVOS

- **Honestidad:** Identidad de la empresa a través de la manera de actuar de sus colaboradores, comportándose y expresándose con coherencia y sinceridad.
- **Respeto:** Valorar a los demás, acatar su autoridad y considerar su dignidad, aplicando estas buenas conductas con los diferentes grupos de interés.
- **Compromiso:** Hace referencia al sentido de pertenencia que los colaboradores tienen por la compañía. Es el vínculo de lealtad mediante el cual el colaborador desea permanecer en la organización debido a su motivación implícita.
- **Solidaridad:** Coordinar e integrar esfuerzos entre las diferentes áreas, colaboradores y procesos tercerizados que se necesitan entre sí para lograr los objetivos propuestos.

POLÍTICA INTEGRAL HSEQ-RSE

La Empresa de Energía de Pereira S.A E.S.P. realiza sus actividades de Generación, Distribución, Comercialización de Energía y Negocios Asociados al sector eléctrico, comprometida con la mejora continua de la Eficacia de su Sistema de Gestión Integral a través de:

- La calidad del servicio y la satisfacción de sus grupos de interés.
- La identificación de Peligros, evaluación y control de sus riesgos para prevenir incidentes y enfermedades laborales.

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

- La protección del ambiente, la prevención de la contaminación y deterioro del entorno, así como el control de sus aspectos ambientales significativos; conforme a la finalidad y el contexto de la organización.

Lo anterior se logrará, apoyado en el cumplimiento de los requisitos legales y otros que la empresa suscriba, en el desarrollo de la cultura corporativa, tecnología integral y del talento humano, actuando en el marco de los principios de la Responsabilidad social y el Desarrollo sostenible.

5.1. Historia.

El 30 de enero de 1914 se inauguró el primer servicio de alumbrado eléctrico en la ciudad, apenas se suministraba energía a 50 casas particulares y a 100 lámparas para las calles. La capacidad de la planta eléctrica era de **50 kilovatios (kw)**.

Figura 14. Subestación Cuba



Fuente: EEP (2018).

Inicialmente esta empresa era una sociedad denominada Empresa Eléctrica de Pereira, de carácter particular. Tuvo una concesión de 10 años de duración, al término del cual

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

el Municipio procedió a la compra. Para 1918 la planta alcanzó a disponer de 200 Kw y firmó contrato con Cartago para el suministro de energía.

En 1930 entra en funcionamiento la primera unidad de la planta libaré con 1250 KVA y en 1936 la segunda con 1500 KVA. Aumentó el suministro de energía a 2750 KVA a una red de 30 Km de extensión; En 1976 salió de servicio la primera unidad, y en 1984 la segunda. Para 1940 comenzó a prestar sus servicios la planta hidroeléctrica de Belmonte que entró a suministrar energía a todas las veredas y a las empresas industriales de la ciudad, está ubicada a 25 minutos de Pereira en la vía que conduce a Cartago y aproximadamente a cien metros bajo el nivel de la carretera central; El acceso final se hace por medio de vía carreteable, cuenta con 4.700 KVA instalados, representados en dos (2) unidades de 2.350 KVA cada una; Fueron puestas en operación en 1937 y 1941 respectivamente y han venido funcionando continuamente y a plena carga; Tiene un alto factor de planta que hace que su generación sea muy estable, se interconecta con la S/E Cuba la cual se muestra en la figura 14 por medio de una línea a 13.200 voltios al Circuito 1 de Cuba.

La planta de generación de Dosquebradas fue puesta en funcionamiento en el año 1956, prestó servicio continuo de generación hasta el mes de abril de **1992**, su capacidad nominal instalada es de 10 MVA, pero solo generaba 8 MVA por razones técnicas. Actualmente la planta está fuera de servicio y probablemente continúe así durante mucho tiempo debido a políticas sociales de la región, que no permiten que la planta se ponga en funcionamiento ya que el canal de conducción recorre sitios habitados del municipio de Dosquebradas presentando fallas geológicas que posibilitan cualquier desastre de gran magnitud. Adicionalmente, con la entrada en operación en 1999 de la ampliación de la Subestación Dosquebradas 115 kV, la tubería de presión tuvo que haber sido cortada en algunos tramos con el propósito de permitir el montaje de las torres que traen el doble circuito de 115 kV a la Subestación; Este equipo se encuentra fuera de servicio desde el 9 de abril de 1992 a causa de una falla ocurrida en el canal de conducción.

Ya para finales de 1959 y después de haber hecho una evaluación se llega a la conclusión de que, para solucionar los problemas de suministro de energía eléctrica en el futuro de la ciudad, se debe lograr una sociedad con la Central Hidroeléctrica de

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

Caldas CHEC. El 12 de junio de 1961 después de un largo proceso se obtuvo el ingreso de las Empresas Públicas de Pereira como socio de la CHEC; Fue así como se brindaron los servicios domiciliarios de: Acueducto y Alcantarillado, Teléfono, Aseo y Energía a la comunidad Pereirana hasta la década de los años noventa.

En 1994 fue puesta en servicio la planta de Nuevo Libaré con capacidad instalada de 6250 KVA, pertenece a un proyecto mixto de acueducto y energía y está conectada directamente con la Subestación Ventorrillo a 13800 voltios.

Nuevo Libaré hace parte de una cadena de micro centrales que, gracias al conjunto integral de ventajas topográficas, ecológicas, hídricas, jurídicas e inclusive históricas, fundamenta la utilización del caudal medio del río Otún y convierte el afluente en la principal fuente de abastecimiento de la ciudad de Pereira; Cuenta dentro de sus instalaciones con equipos que ofrecen una alta confiabilidad de respuesta ante variación en las condiciones de operación, lo que hace que no tenga nada que envidiarle a las grandes Centrales que poseen equipos de última tecnología.

A finales del año 1991 se presentó el fenómeno del "NIÑO", que secó la mayoría de los embalses del Sistema Eléctrico Nacional por lo cual el país y nuestra región se vieron sometidas al más intenso y prolongado racionamiento que recuerde la historia entre el 2 de marzo de 1992 y el 1 de abril de 1993, con una intensidad superior a 4 horas diarias. Ante estos hechos, se vio la necesidad en Colombia de modernizar el sector eléctrico, esta reestructuración se realizó con la expedición y puesta en marcha de la Leyes 142 (Ley de servicios públicos) y 143 (Ley eléctrica) de 1994, las cuales definieron el marco regulatorio para establecer las condiciones que permitieran que su desarrollo estuviese determinado bajo la competencia sana; Estas Leyes crearon el mercado mayorista de energía eléctrica; la reglamentación de este mercado fue desarrollada por la Comisión de Energía y Gas (CREG) y se aceleró el proceso de desagregación de las empresas de servicio públicos del Estado para que prestasen de manera óptima sus servicios.

A través del acuerdo 30 del 10 de mayo de 1996 expedido por el Concejo Municipal, sancionado el 16 de mayo del mismo año, autorizó al alcalde de Pereira de turno para transformar el establecimiento público: Empresa Públicas de Pereira, conformando entre otras, una sociedad por acciones para prestar el servicio público

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

domiciliario de energía, cuya denominación sería: "EMPRESA DE ENERGIA DE PEREIRA" S.A.-ESP", como se estipuló en la escritura pública No 1327 del 16 de mayo de 1997; es así como nace jurídicamente la Entidad.

El proceso de capitalización de la Empresa de Energía de Pereira se inició en el primer semestre del año 2008, en donde participaron Empresas como la "Empresas Públicas de Medellín (EPM)" y la empresa Enertolima, ya que Electro-huila decidió no participar del proceso. Finalmente, Enertolima se quedó con el 49 por ciento de la Empresa de Energía de Pereira (EEP).

Dando cumplimiento a las fechas estipuladas para realizar los aportes a la capitalización de la Empresa de Energía de Pereira, ENERTOLIMA cumplió con el pago de \$181 mil millones, totalizando así los \$202 mil 500 millones que le significaron el obtener el 49% de las acciones de la electrificadora de Pereira.

Así queda en firme la sociedad entre La Promesa de Sociedad Futura Enertolima y la Empresa de Energía de Pereira, iniciándose una nueva etapa de fortalecimiento entre estas dos regiones cercanas: Tolima y eje Cafetero. EEP, (2019).

6. DISEÑO METODOLÓGICO

El diseño de esta investigación es metodología mixta y del tipo de investigación – acción ya que se diagnostica un problema de tipo participativo enfocado en generar cambios para mejorar el nivel de vida y desarrollo humano de los individuos, como tal se debe llevar a cabo un plan para tratar el problema.

En sus fases esenciales de este tipo de investigación se encuentra el observar (bosquejo del problema y recolección de datos), pensar (analizar e interpretar) y actuar (implementar mejoras) (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014).

Por medio de la investigación – acción se pretende detectar y diagnosticar el problema de investigación, luego realizar la formulación del plan de acción que lleve a encontrar la solución del problema logrando ejecutar un plan de acción y poder evaluar los resultados obtenidos.

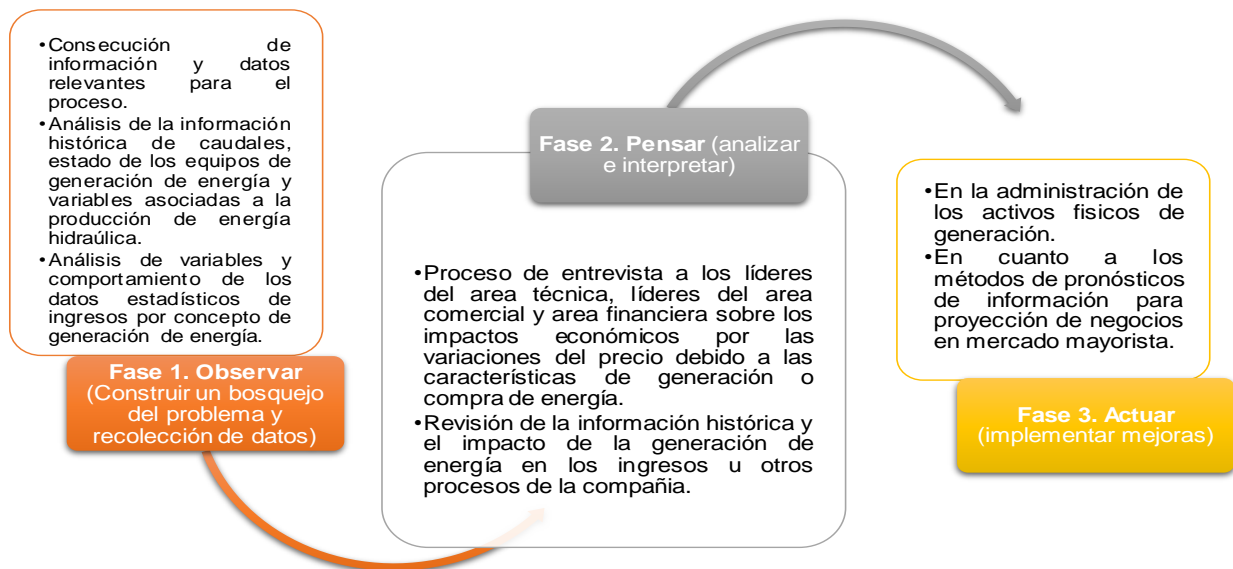
El último de los ciclos en este tipo de investigación está relacionado con la retroalimentación que lleve a formular estrategias o acciones que permitan corregir las desviaciones que se identifican, así mismo según (Hernández et al., 2014) dice que este tipo de investigación se puede aplicar a una problemática genérica de una organización y se fundamenta en un proceso de mejora continua.

De acuerdo con el tipo de investigación a aplicar (Investigación – acción), se propone realizar entrevistas al personal del área técnica involucrado en el proceso de generación de energía y con más experiencia o años de antigüedad que han visto las variaciones presentadas en los históricos de datos con fuentes de información histórica de caudales de la compañía.

Como metodología general se realiza el proceso de entrevista y recolección de datos los cuales se usan para generar el análisis estadístico y el modelo de pronóstico a llevar a cabo mediante la simulación con el software Forecast X en el método ARIMA

La metodología que se sigue para cumplimiento del planteamiento del proceso investigativo, así como la propuesta de intervención se muestra en la figura 15, con esto se propone tratar lo relacionado con el diagnóstico acorde con cada una de las fases relacionadas en la metodología desarrollada.

Figura 15. Diseño Metodológico



Fuente: Elaboración propia a partir de (Hernández et al., 2014).

FASE 1. OBSERVAR “CONSTRUIR UN BOSQUEJO DEL PROBLEMA Y RECOLECCIÓN DE DATOS”

Se realiza acercamiento con personal técnico de la empresa, específicamente con el Líder del área de generación de energía hidráulica a fin de identificar aspectos relevantes relacionados con los caudales del río Otún y su afectación a los procesos de generación de energía, se observa información y variables económicas que pueden ser afectadas debido al comportamiento de las curvas de generación de energía y la importancia de estas para la planeación de la empresa.

CONSECUCCIÓN DE INFORMACIÓN Y DATOS RELEVANTES

A fin de lograr obtener y recopilar la información necesaria relacionada con las variables que inciden en los índices de comportamiento de los procesos de generación de energía eléctrica así como la importancia de los caudales de río, el estado de la infraestructura y diferentes componentes climáticos y de crecimiento poblacional se plantea la utilización de la entrevista abierta como instrumento de recolección de

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

información además de la información que suministra la empresa para el desarrollo del proyecto.

Se selecciona como instrumento para la recolección de información en la modalidad de entrevista abierta como técnica cualitativa la cual es usada en los procesos de investigación y basada en preguntas abiertas que permiten conocer de fondo la posición del entrevistado frente al tema objeto de investigación (Hernández et al., 2014).

El instrumento de recolección de información en este caso la entrevista abierta se diseñó con 12 preguntas abiertas enfocadas en recopilar información de los especialistas en los procesos de generación de energía con respecto a su punto de vista frente a las necesidades de la compañía sobre obtener un modelo de pronóstico para la simulación del caudal de río y de qué manera este modelo podría impactar económicamente los procesos e indicadores financieros.

De acuerdo con la revisión de la literatura llevada a cabo durante el marco teórico donde se abordan los conceptos sobre energía, caudales de río, pronósticos y su importancia en el sector eléctrico, se seleccionan las siguientes variables, así como su conceptualización y operacionalización relacionadas en la tabla 1:

Tabla 1. Definición de variables

Variable	Dimensión	Indicadores	Pregunta Asociada
Generación de energía	Fuente de suministro	Producción diaria	1, 3
	Mantenimiento programado	Cumplimiento de planes	6
Caudal de río	Medición	Sensores de control	2, 10
Métodos de pronóstico	Predicción	Estadísticos de prueba	4, 8
Proyección precios energía	Información	Presupuestos	4, 12
Variación precios de Kw/h	Economía	Comportamiento del mercado	5
Precio de energía en bolsa	Mercado	Precio diario	9, 11
Planeación	Estrategía	Seguimiento y control	5, 7

Fuente: Elaboración propia.

Para la selección de la muestra de la población a entrevistar teniendo en cuenta los líderes del proceso y a su vez la cantidad de especialistas involucrados en total 5 personas se lleva a cabo censo a fin de obtener 100% de información vinculada a la aplicación de la investigación.

Entrevista abierta

Así como el estudio llevado a cabo por Balcazar, Garcia e Iriarte (2009) y Suarez y Balcazar (2009) las entrevistas a realizar al personal líder del área técnica, área comercial y financiera son de gran importancia dado que los procesos están relacionados con el objeto de estudio y la información que podrán brindar será clara y acertada en lo relacionado con el proyecto.

La información que proporcionara la empresa y el acceso a las visitas que sean necesarias para recopilar los datos respectivos son fuente importante como insumo para el análisis de los datos y la identificación de las variables objeto de estudio, se tendrá acceso a las diferentes fuentes de información para descargue de información histórica de comportamiento de generación de energía como también las bases de datos donde queda registrado los caudales del río Otún en las diferentes ubicaciones de los equipos de monitoreo climáticos, así como se detalla en el párrafo anterior, se realiza la aplicación de la encuesta mediante censo a los 5 líderes del proceso involucrados de manera directa en el análisis de la información y planeación de la compra y venta de energía.

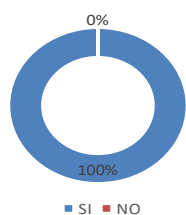
A continuación, se relaciona el instrumento de recolección de información utilizado el cual fue aplicado a la totalidad de los líderes del proceso relacionados con el objeto de la investigación y con los cuales se logra obtener información de gran importancia para el desarrollo del estudio de investigación, durante el diseño del instrumento se tuvo en cuenta las variables asociadas de acuerdo con la literatura estudiada durante el desarrollo del marco teórico con el fin de cumplir los objetivos planteados en el proyecto y que de acuerdo con el plan de intervención sería necesario para la ejecución de la prueba piloto, de acuerdo con Creswell (2013), el cual sugiere la identificación de variables principales y dependiendo el tipo de estudio señalar las causas y los efectos o consecuentes y factores intervinientes las cuales se muestran en adelante con el análisis de los resultados de la entrevista abierta.

Análisis de variables y comportamiento de los datos estadísticos

A continuación, se presenta el análisis de la información obtenida con la aplicación de la entrevista a los 5 especialistas:

Figura 16. Importancia del Río Otún

1. Considera que es importante el río Otún como fuente de suministro para la generación de energía?

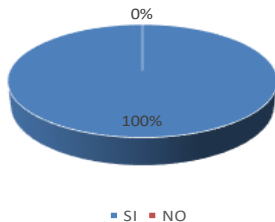


Fuente: Elaboración propia

En la figura 16 se encuentra que el 100% considera importante el río Otún como fuente de suministro ya que de allí se abastece los procesos de generación de energía y es una fuente esencial de recursos para la ciudad.

Figura 17. Importancia de pronóstico de caudal

2. Con respecto al caudal del río, le parece que sería importante pronosticar los niveles y como esta información ayudaría a los procesos de generación de la empresa?

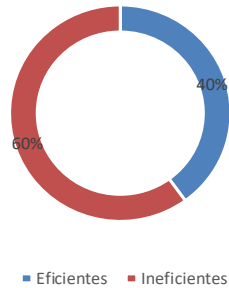


Fuente: Elaboración propia

En la figura 17 se muestra que el 100% de los entrevistados considera que es importante la realización de pronósticos de caudal de río para la medición de los niveles de generación y poder anticipar las decisiones de compra o venta de energía en el mercado energético.

Figura 18. Eficiencia de los procesos

3. Con respecto a los procesos de generación de energía de la empresa, que podría decir?

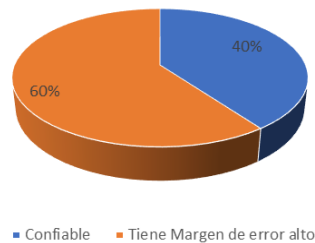


Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la figura 18 se muestra que de los especialistas entrevistados el 60% considera que los procesos de generación de energía en la empresa son ineficientes debido a que existe una capacidad mayor y no se aprovecha, solo el 40% consideran que es eficiente dado los recursos existentes a nivel interno en cuanto a personal y equipos.

Figura 19. Confiabilidad de información

4. Como se realiza el suministro de información con respecto a los pronósticos de generación de energía al área comercial?



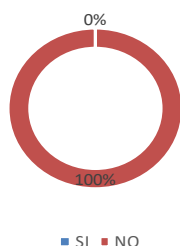
Fuente: Elaboración propia

El 60% de los entrevistados de acuerdo con la figura 19 considera que la información entregada al área comercial contiene un alto margen de error debido a los métodos de análisis de información utilizados para la planeación, el 40% considera que la información es confiable.

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

Figura 20. Efectividad de los modelos actuales

5. Considera que los modelos utilizados para la planeación de generación de la empresa son efectivos?

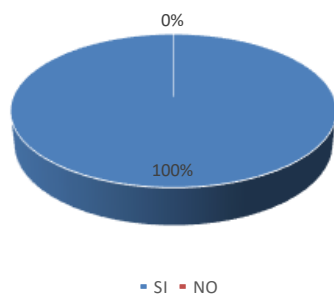


Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con el resultado mostrado en la figura 20, el 100% de los entrevistados considera que los modelos de planeación para la generación de energía no son efectivos, se considera existe una incertidumbre alta por la disponibilidad del recurso hídrico en la región y los métodos de planeación de mantenimiento de los equipos no están automatizados ni centralizados en un software especializado.

Figura 21. Importancia de la simulación

6. Le parecería importante poder simular el caudal del río y a su vez los niveles de generación de las PCHs?



Fuente: Elaboración propia

En la figura 21 se observa que el 100% de los participantes considera importante lograr una simulación del caudal del río y poder analizar los niveles de caudal llevando esto a encontrar una correlación para la planeación de las paradas de mantenimiento y una mayor eficiencia del proceso.

Figura 22. Impacto de los pronósticos en la planeación

7. Como consideraría que podría impactar unos buenos pronósticos de generación en la planeación de la compañía?

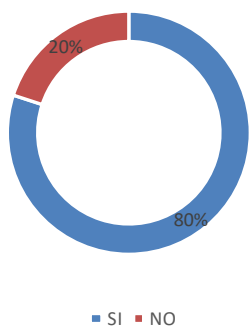


Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la figura 22 a la pregunta 7 todos los entrevistados consideran que tener un buen modelo de planeación y pronósticos generaría un impacto positivo para la compañía.

Figura 23. Pronósticos en sistemas de generación de energía

8. Conoce algún método de pronóstico aplicado en sistemas de generación de energía?

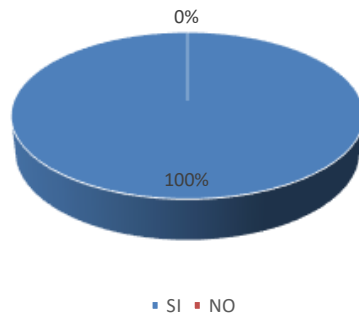


Fuente: Elaboración propia

A la pregunta 8 relacionada en la figura 23 el 80% de los entrevistados dice conocer diferentes métodos de pronóstico que se aplica normalmente a los procesos de generación de energía coincidiendo en que el más utilizado es el modelo ARIMA.

Figura 24. Impacto de los pronósticos en los indicadores económicos

9. Creería que los indicadores económicos de la empresa podrían mejorar si se utiliza un buen método de pronóstico en los procesos?

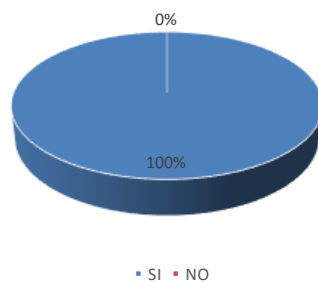


Fuente: Elaboración propia

El 100% de los entrevistados según la figura 24 opinan que los indicadores económicos de la empresa tendrían un impacto positivo al utilizar un buen método de pronóstico ya que de esta forma se tendría mayor confianza en las negociaciones que se realizan en el mercado mayorista.

Figura 25. Aporte de la información al factor ambiental y social

10. Considera que el análisis de la información podría arrojar información de ayuda para el factor ambiental y de consumo de la población?



Fuente: Elaboración propia

En la figura 25 el 100% coincide en la importancia de un buen análisis de información a nivel general para la población desde el punto de vista ambiental y crecimiento para la planeación de la ciudad, así como los incentivos al cuidado y correcto uso del recurso hídrico.

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

Figura 26. Apoyo de los pronósticos a los procesos

11. De que manera ayudaría en su proceso el obtener un modelo de pronóstico que arroje información con menor incertidumbre?

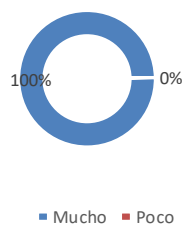


Fuente: Elaboración propia

El 100% de los participantes según la figura 26 considera que en el proceso que lidera en la compañía, le ayudaría tener información con menor incertidumbre y que un buen modelo de información es esencial para la mejora y optimización de la planeación.

Figura 27. Importancia en la planeación del sector eléctrico

12. Por último, que tan importante a nivel general para las organizaciones sería tener una herramienta que ayude en la planeación de generación de energía?



Fuente: Elaboración propia

Para la pregunta 12 relacionada en la figura 27 se encuentra que el 100% de los participantes considera muy importante para cualquier organización del sector eléctrico contar con herramientas de análisis y apoyo en la planeación de generación de energía, esto permitiría obtener mayor eficiencia en sus procesos y disminuir costos que a su vez podrían ser trasladados al usuario final.

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

De acuerdo con el instrumento utilizado para la recolección de información, se tiene que, de las 12 preguntas de la entrevista, se identifica correlación entre la información teórica recolectada en el marco teórico y las variables identificadas teniendo coincidencia en las respuestas de acuerdo con la problemática identificada.

Además de la información recolectada por medio del instrumento, también se facilitara el acceso a la información necesaria relacionada con los históricos de generación de energía, comportamiento financiero y el impacto de los ingresos por concepto de generación de energía hidráulica, así como la información relacionada con el comportamiento de los precios de energía en bolsa y las fuentes de los datos que impactan la variación de los precios, así como las variables que afectan las proyecciones de precio de energía.

Se brindara acceso a la plataforma red-hidro del eje cafetero en la cual se podrá consultar el comportamiento de la información de los caudales en tiempo real así como la información histórica de los sensores ubicados en cada una de las cuencas e instalaciones de las centrales de generación donde se detecta los niveles del caudal y sus variaciones de forma significativa, con la información recolectada por parte de los sensores se podrá realizar los análisis de datos necesarios para definir estadísticos de prueba e información de entrada para las simulaciones con el método seleccionado para la prueba piloto.

En cuanto a la información general de la compañía en temas financieros e históricos de generación se brindará el soporte y la asesoría necesaria de parte de las áreas comercial y financiera a fin de poder identificar los impactos de los comportamientos del caudal en los niveles de generación de energía y los ingresos en términos económicos representados en indicadores para la compañía.

Teniendo presente las variables ambientales que inciden en el comportamiento del caudal del río según los datos históricos y en tiempo real se podrá realizar aproximación acerca de los impactos e incidencias en las proyecciones o estimaciones que se realizaran por medio de la prueba piloto.

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

FASE 2. PENSAR (ANALIZAR E INTERPRETAR)

Al realizar el proceso de entrevista a los líderes y personal operativo del área técnica así como líderes del área financiera y área comercial se busca conocer el funcionamiento general del proceso y su interrelación así como las variables que afectan los procesos de generación de energía eléctrica por medio de las turbinas hidráulicas que dependen del caudal del río Otún para su funcionamiento como fuente de suministro, las incidencias que esta variación ocasiona a los pronósticos del área comercial y las condiciones económicas de la compañía que se ven afectadas o relacionadas con la información de pronósticos para la planeación financiera.

Con la información estadística suministrada por la compañía se busca identificar los métodos de análisis de información que simulen los escenarios con los cuales se puedan simular escenarios de acuerdo con las variables relacionadas, así como la correlación entre el caudal de río y la generación de energía con las plantas a filo de agua según los sensores de monitoreo de caudal disponibles en la red hidroclimatológica disponible en la ciudad.

FASE 3. ACTUAR (IMPLEMENTAR MEJORAS)

En el diagnóstico que se va a realizar se pretende obtener resultados con los cuales se pueda desarrollar una propuesta de intervención con su plan de acción y prueba piloto buscando mitigar las vulnerabilidades identificadas en la información que se suministra al área comercial y financiera por cuenta de las afectaciones a los procesos de generación de energía hidráulica generada por los factores climáticos que ocasionan la variación de los caudales del río Otún y por ende las proyecciones de producción de energía en las centrales.

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

CONTRIBUCIONES ESPERADAS

Las contribuciones que se espera brindar a la Empresa de Energía de Pereira con el desarrollo de este trabajo en la modalidad de trabajo dirigido serian:

- Diagnóstico de la situación actual en el proceso de proyección de información en las plantas de generación de energía hidráulica.
- Mejora en la confiabilidad de la información suministrada al área comercial y financiera para transacciones del mercado.
- Mejora en las fuentes de información para cálculos de presupuestos.
- Análisis de métodos de pronóstico para el caudal del río.
- Análisis de las condiciones de disponibilidad del recurso hídrico en el río Otún.
- Información confiable sobre paradas de planta por concepto de escasez de agua o bajos niveles de caudal del río.
- Mejora en indicadores financieros por concepto transacciones en bolsa.

Es probable que según los resultados del estudio puedan obtenerse otros beneficios relacionados con el aspecto ambiental y análisis de riesgos para la región por cuenta de la disponibilidad del recurso hídrico como fuente de consumo humano, así como información sobre conciencia y cuidado de los ríos en el municipio.

7. DESARROLLO DEL TRABAJO

7.1. DIAGNÓSTICO DE LAS PLANTAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA HIDRÁULICA EN LA CIUDAD DE PEREIRA

El diagnóstico obtenido en este documento se desarrolló a través de la información consultada previamente en las bases de datos de la compañía e información suministrada por el área técnica, así como el área comercial la cual tiene un aporte importante ya que basados en información veraz y organizada obtenida por medio de las entrevistas como instrumento de recolección de información y según el análisis de los datos obtenidos se logra contar con insumos confiables para los modelos llevados a cabo de acuerdo con los planteamientos del diseño metodológico, así mismo, por medio de la investigación acción se identifica la necesidad de llevar a cabo un estudio de análisis estadístico de información para proyectar acciones de mejora que permitan mejorar la planeación en el proceso de generación de energía.

Se lleva a cabo trabajo de campo por medio de visitas a las diferentes sedes de la compañía como la planta Nuevo Libare y la Planta Belmonte, también se visita la Bocatoma Belmonte y Tanque Villa Santana donde se tienen elementos que miden el caudal y operarios trabajando 24 horas del día monitoreando los niveles de agua y permitiendo el paso del líquido para las tuberías y canales que conducen a las turbinas generadoras, desde estas sedes y con la información del personal encargado se procede con entrevistas acerca de la importancia del caudal del río en los procesos de generación de energía hidráulica.

Con la información recopilada a través de las entrevistas y el análisis de las respuestas se logra identificar una amplia necesidad de la empresa en cuanto a mejora en el proceso de planeación y calidad de la información suministrada para negociaciones de energía a futuro, se identifican oportunidades de mejora en el proceso de generación de energía que sustenta las recomendaciones a proporcionar, la presente investigación permite cumplir los objetivos y brindar una propuesta de intervención acertada, la formulación del plan de mejora enfocado en disminuir la incertidumbre en las proyecciones de caudal brinda un objetivo importante para el municipio de Pereira en cuanto a la conservación del recurso hídrico.

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

En la consecución de la información durante el proceso de entrevista al líder del área comercial se tiene que el consumo de energía para el 2016 presentó un incremento en 932 MWh entre el Mercado Regulado (MR) y el Mercado No Regulado (MNR), este factor asociado al incremento en la tarifa promedio ponderada y al incremento en los usuarios redundan en el aumento de los ingresos Operacionales en \$ 51.531 millones respecto al 2015, es decir un 24,42%. Otro factor que incidió positivamente en los resultados de la compañía fueron las ventas en bolsa, las cuales registraron mayores ingresos por valor de \$ 8.218 millones, debido principalmente a que el Ingenio Risaralda (Cogenerador representado por la EEP) incrementó la capacidad de generación de 8 MW a 15 MW, generando así excedentes de energía por aproximadamente 69 GWh-año los cuales fueron vendidos en bolsa. Asimismo, los costos y gastos operacionales del año a pesar de presentar un aumento en \$31.180 millones, equivalentes a un 18,13% respecto al año anterior, fueron inferiores a los ingresos los cuales aumentaron en un 24,42%, siendo el costo por compras de energía el de mayor variación corresponde a la compra de energía por valor de \$25.265 millones, lo cual se debe a mayores compras de energía a través de contratos bilaterales con otros agentes del mercado, lo anterior resaltando la importancia del precio en bolsa y la manera en que se ve impactada la compañía según las transacciones del mercado nacional.

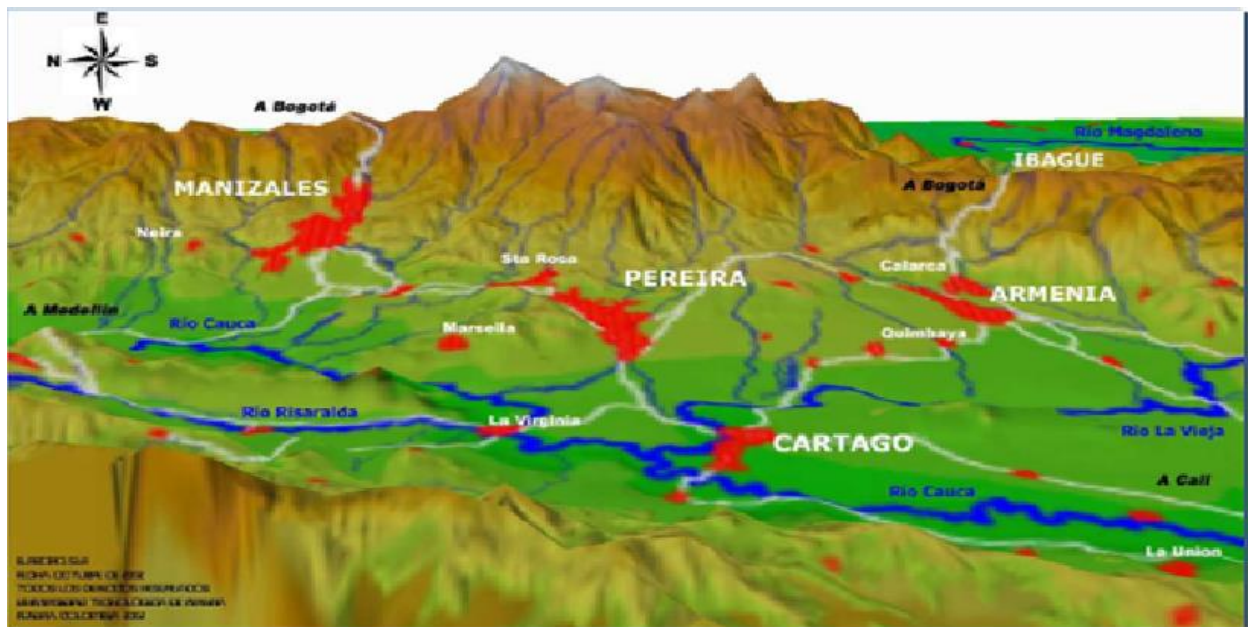
La compañía cuenta con dos PCH (Pequeñas Centrales Hidroeléctricas) una llamada Libaré y la otra llamada Belmonte, la primera ubicada en el sector de la florida a inicios del Rio Otún y la otra en las afueras de la ciudad en la vía a Cerritos, ambas captando agua para generación de sus sistemas directamente del rio Otún en dos partes importantes y dependiendo del caudal para sus niveles de generación, de acuerdo con Gutierrez, (2013) el nivel de generación de las plantas determina la cantidad de energía que debe tomarse de la red eléctrica a precio de bolsa o según los contratos de compra con otros generadores.

En cuanto a la capacidad de las dos plantas de generación de energía hidráulica las cuales utilizan la captación de agua del rio Otún, no se cubre la demanda de energía de la ciudad, la planta Belmonte tiene una capacidad de generación de 3,6 MWh y la Planta Libare una capacidad de 5,4 MWh; la diferencia de energía es tomada

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

del sistema interconectado nacional el cual es operado por la compañía XM filial de ISA quien se encarga de cruzar las transacciones de energía para balance del sistema administrando las cargas para garantizar suministro a toda la red, de acuerdo con (Ramírez, 2009) las compañías deben hacer contratos de compra y/o venta de energía a futuro a fin de tener cubierta su demanda y disminuir su incertidumbre o exposición a realizar transacciones de compra de energía en bolsa, las variaciones del valor del Kw sometido a la bolsa depende de múltiples factores en el sector, ya sea por jornadas de invierno, verano, fenómeno del niño, la niña o costos de combustibles para generación térmica, por costos de generación de las diferentes fuentes o daños a infraestructura del sistema eléctrico nacional.

Figura 28. Contexto regional



Fuente: CARDER (2017).

En la figura 28 se muestra un bosquejo general de la ciudad sobre la forma, topografía, ubicación y relaciones hídricas con la región.

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica. las líneas de transmisión mediante las redes o infraestructura eléctrica para llegar a las subestaciones que la transforman para entrega a redes de menor nivel finalmente siendo entregada a los usuarios (Gonzalez, 2004).

7.1.1 Planta Belmonte.

Figura 30. Planta de generación Belmonte



Fuente: Elaboración propia tomada en visita de campo.

Tabla 2. Datos técnicos planta Belmonte

TIPO GENERADOR	HIDRÁULICO
CAPACIDAD EFECTIVA	3.6 MW
GENERACIÓN MÍNIMA	1.0 MW
TIEMPO MÍNIMO DE GENERACIÓN CON CARGA	10 MINUTOS
RATA DE CARGA	3.6 MW
RATA DE DESCARGA	3.6 MW
CARGA SINCRÓNICA	0.5MW
TIEMPO DE CALENTAMIENTO	INMEDIATO
TIEMPO MÍNIMO DE DESCONEXIÓN	' 1 MINUTO

Fuente: Elaboración propia con información de Energía de Pereira.

Durante las visitas a terreno y las entrevistas a personal del área técnica se logra recopilar la información relacionada con los datos técnicos de las sedes e información

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

relevante para el proceso de diagnóstico, con respecto a la Planta Belmonte para el personal técnico y operadores es vista como la fuente de ingresos más constante para la compañía dado que por su ubicación aguas abajo de la ciudad de Pereira no se ve tan impactada por las tomas de agua directa de la planta de tratamiento para consumo humano dando así generación más constante por concepto de afectación del caudal, la planta Belmonte es la más antigua en su construcción puesta en marcha durante los años 1950 y cuenta con dos turbinas cada una de 28 canjilones, conectada a una tubería de 288 metros de longitud con una caída de 115 metros a una presión de 170psi transportando 4,5 metros cúbicos por segundo de agua, esta misma tubería recibe el líquido de un canal de 6300 metros de largo el cual es alimentado por una Bocatoma que se encarga de garantizar el caudal mínimo del río y tomar sus niveles superiores para canalizarlo y dirigirlo a la PCH, en la Bocatoma se realiza el proceso de limpieza y dirección del agua reportando diariamente los niveles de caudal para garantizar el cumplimiento de normas ambientales.

En la tabla 3 se describen las características de las dos unidades de generación ubicadas en la PCH, teniendo en cuenta la antigüedad de la planta y los mantenimientos realizados se debe realizar rutinas constantes de inspección y seguimiento, los costos de mantenimientos representan una disminución del ingreso constante, es de destacar que aunque el activo tiene una edad alta se ha podido alargar la vida útil garantizando generación durante unos 20 años más por encima de la vida útil de las turbinas, se identifica en el proceso de diagnóstico una necesidad constante de mantenimiento y overhaul el cual debe ser alineado con la planeación y pronósticos de disponibilidad del recurso hídrico para optimizar el uso de las turbinas y disponibilidad del agua dado las restricciones de caudal e incertidumbre en la disponibilidad el recurso hídrico proveniente del caudal del río Otún.

Tabla 3. Características de las unidades generadoras Belmonte

Planta	Unidad	Sni(MVA)	Vn (kV)	Sbu (MVA)	Vbv <kV)	Zbv(p.u)		Zbn (p.u)		Vbn (kV)	Strm (MVA)	Vel. RPM	Conex.
Belmonte	G1	2,35	2,4	2,35	2,4	0,012	0,25	0,306	6,383	2,4	60	450	Yaisl.
	G2	2,35	2,4	2,35	2,4	0,012	0,25	0,306	6,383	2,4	60	450	Yaisl.

Fuente: Elaboración propia con información de Energía de Pereira.

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

7.1.2 Planta Libaré.

Figura 31. Planta de generación Libaré EEP



Fuente: Elaboración propia tomada en visita de campo.

En la visita realizada a la planta y con entrevistas al personal encargado del área técnica se logra obtener la siguiente información.

La planta de generación Nuevo Libaré presenta unas especificaciones técnicas más modernas que la planta Belmonte, esto permite que la misma pueda iniciar generación de energía con menos caudal y además cuenta con una sola turbina con la cual su capacidad de generación es mayor que la planta Belmonte la cual tiene dos turbinas, la longitud de la tubería es menor sin embargo su caída es mayor lo cual permite obtener más fuerza para accionar las turbinas, durante la construcción de la planta la empresa era una sola en conjunto con la empresa de acueducto y telefonía

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

por lo tanto no se previó que en un futuro se diera una escisión de las empresas y entrara en juego la captación de agua como recurso primordial tanto para generación de energía como para consumo humano dado que comparten el mismo tanque debiendo garantizar un caudal ecológico del río.

El tanque de reserva de agua presenta niveles con los cuales se permite operar ambas empresas, teniendo en cuenta que el recurso hídrico es limitado ocasiona que la planta de generación Libare presente paradas constantes no por mantenimiento o revisiones técnicas sino por falta de agua para poner en funcionamiento, de allí la importancia de lograr tener una correcta planeación con análisis estadístico de datos y métodos de pronóstico con poca incertidumbre alineado con una correcta planeación de mantenimientos paralelos y determinar la producción de energía en un horizonte de tiempo.

Figura 32. Tanque Villasantana EEP



Fuente: Elaboración propia tomada en visita de campo.

En la figura 32 se muestra el tanque de carga que es compartido con la empresa que suministra agua para el consumo humano, aquí se controla el caudal de río.

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

Figura 33. Tablero control de caudal EEP



Fuente: Elaboración propia tomada en visita de campo.

En la PCH Libaré se requiere para arranque de generación un caudal de 100 litros por segundo mínimo, después de iniciada la generación se puede bajar a entre 80 y 90 caudal mínimo, a continuación, en la tabla 4 se detallan algunas características básicas con las que cuenta la planta.

Tabla 4. Datos técnicos Planta Libaré

TIPO GENERADOR	HIDRÁULICO
CAPACIDAD EFECTIVA	5.4 MW
GENERACIÓN MÍNIMA	1.0 MW
TIEMPO MÍNIMO DE GENERACIÓN CON CARGA	10 MINUTOS
RATA DE CARGA	5.4 MW
RATA DE DESCARGA	5.4 MW
CARGA SINCRÓNICA	0.5MW
TIEMPO DE CALENTAMIENTO	INMEDIATO
TIEMPO MÍNIMO DE DESCONEXIÓN	1 MINUTO

Fuente: Elaboración propia con información de Energía de Pereira.

En la tabla 4 se relaciona información técnica de la unidad de generación en cuanto a capacidad se tiene que puede generar con poco caudal hasta un límite inferior de 1MW y una capacidad instalada de 5,4MW.

Tabla 5. Características de las unidades generadoras Libaré

Planta	Unidad	SniMVA'	Vn (kV)	Sbu (MVA)	Vbv <kV)	Zbv(p.u)		Zbn (p.u)		Vbn (kV)	Stm (MVA)	Vel. RPM	Conex.
Libaré	G1	6,25	13,8	5	13,8	0,015	0,18	0,181	2,16	13,8	60	720	Yat

Fuente: Elaboración propia con información de Energía de Pereira.

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

En la tabla 5 se muestra datos técnicos de la unidad de generación en Libare, se identifica que solo cuenta con un generador y las especificaciones generales.

Figura 34. Unidades de conexión generación-Distribución Libaré



Fuente: Elaboración propia tomada en visita de campo.

La figura 34 muestra las celdas del proceso de conexión y distribución de la planta Libare, equipos tele controlados sin operador.

Figura 35. Tubería de Presión Planta Libaré.



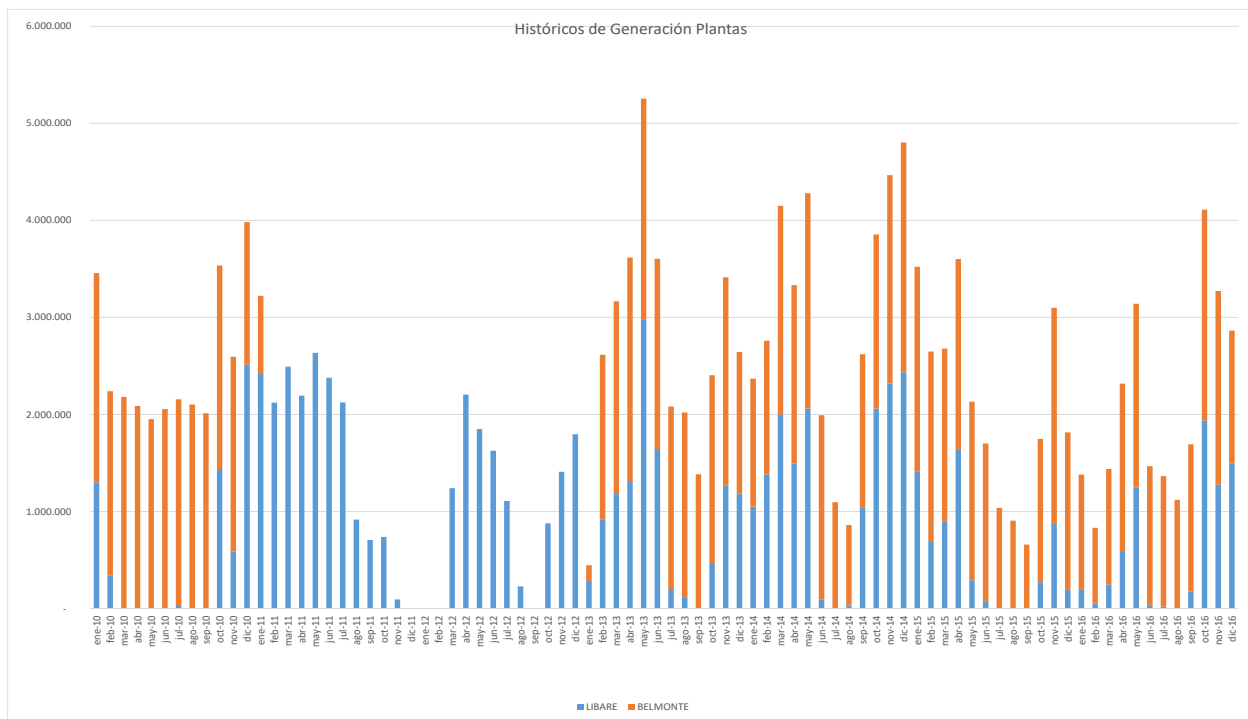
Fuente: Elaboración propia tomada en visita de campo.

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

En la parte superior de la tubería se encuentra el barrio Villasantana y la planta de tratamiento de agua de la empresa Aguas y Aguas de la ciudad de Pereira, desde allí se capta y se desvía el agua para consumo de la ciudad, cuando el nivel del caudal es alto se permite tanto la captación de agua para consumo humano como la captación de agua que baja por la tubería para generación de energía, en tiempos de sequía no es posible la generación de energía dado que la prioridad en la captación es para el consumo de la ciudad, la variabilidad del clima de manera constante no permite tener una correcta planeación de la generación de energía, aunque existe información histórica mes a mes esta no es usada de manera eficiente para realizar pronósticos y alinear los planes de mantenimiento pues las áreas trabajan como islas sin compartir información y sin tener en cuenta la importancia o el impacto económico positivo que podría repercutir para la compañía al generar sinergia optimizando los procesos.

En la figura 36 se muestra los históricos de generación de energía de ambas plantas detalladas de manera mensual desde el año 2010 hasta el año 2016.

Figura 36. Históricos de Generación Plantas Belmonte y Libaré 2010 - 2016



Fuente: Elaboración propia con información tomada de Energía de Pereira.

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

Tomando como referencia la información de la figura 36, podemos observar que durante febrero de 2011 y diciembre de 2012 la planta Libaré fue la única que estuvo produciendo energía para inyectar al SDL (sistema de distribución local), a pesar de que diciembre de 2011 a febrero de 2012 no se observó generación de energía, la planta Libaré presentaba buenos niveles de generación de energía, pero al observar las gráficas de generación desde mayo de 2015 los niveles de generación de energía en Libaré han presentado una disminución, sería entonces necesario proyectar horizontes de tiempo basados en los datos históricos para pronosticar los niveles de generación de energía lo que sin duda aportaría a la toma de decisiones y presupuestos económicos de la compañía así como las decisiones en compra y venta de energía que se dan en la bolsa con la información interna de generación y las proyecciones de la compañía XM como operador del sistema interconectado nacional.

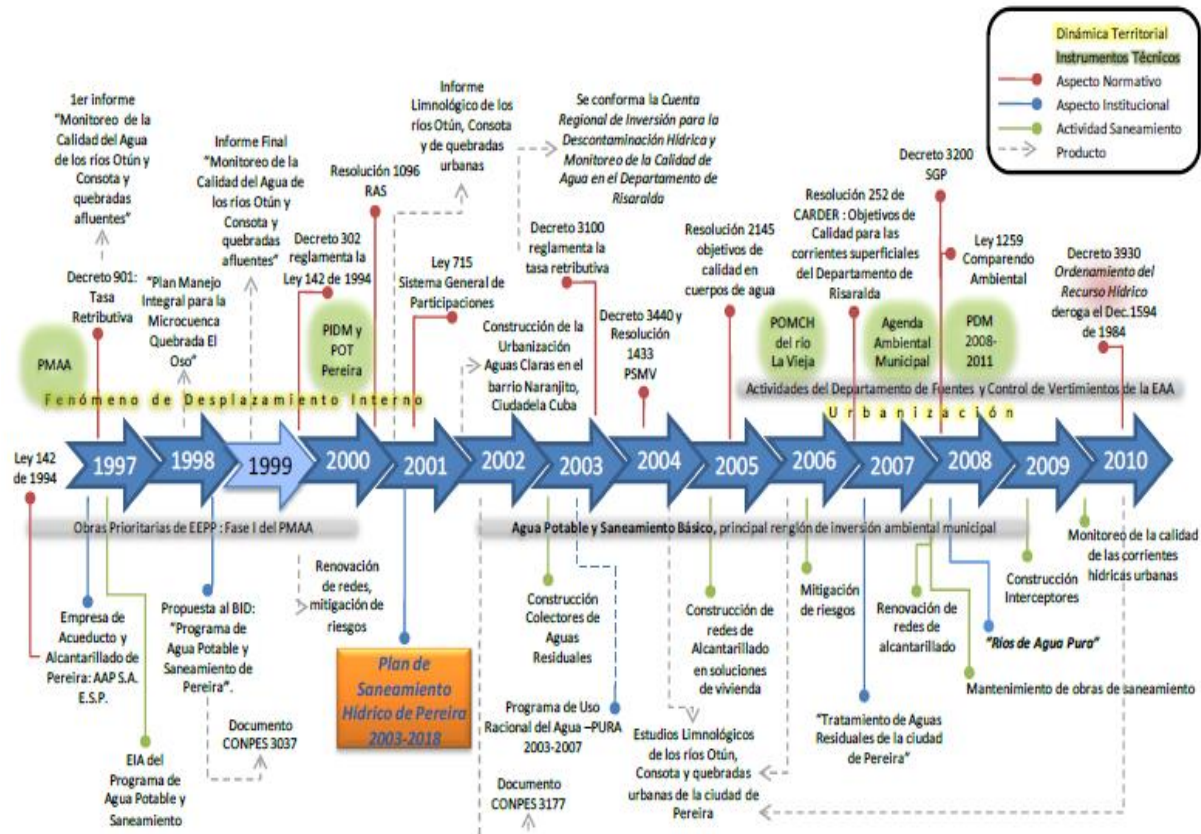
7.2. BALANCE HÍDRICO DEL SECTOR Y PRONÓSTICOS DE CONSUMO

Con la información suministrada por la empresa y las bases de datos locales se procede a realizar consultas acerca del sector, el balance hídrico y las proyecciones de consumo, de esta forma realizar análisis sobre el recurso objeto de estudio y la importancia de esta información acorde con el diseño metodológico planteado.

En la siguiente grafica se observa en una línea de tiempo algunas incidencias relevantes en cuanto al saneamiento del recurso hídrico en el área urbana de la ciudad de Pereira, soportado en estos datos permite dar fuentes de información para el análisis de algunas variables relacionadas con el estudio.

Figura 37. Línea cronológica de la gestión del saneamiento del recurso hídrico en el área urbana de Pereira

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.



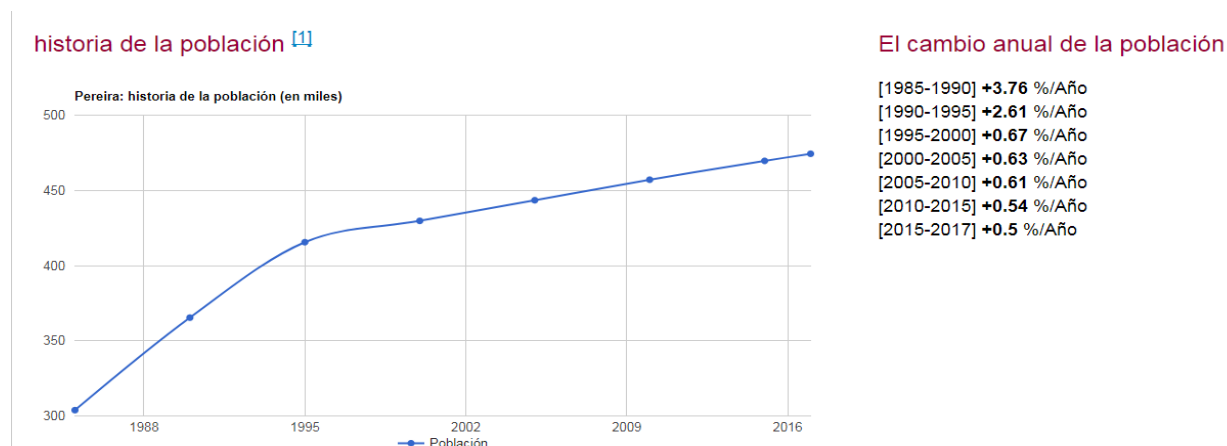
Fuente: Cárdenas (2013).

Con la línea de tiempo y las reglamentaciones en materia ambiental para preservación del recurso hídrico se fundamenta la importancia para la región y la evidente evolución de conservación ambiental, además de las leyes en materia de protección ambiental y la normativa regulatoria, se observa que también existe una voluntad por parte de los entes territoriales a fin con la conservación del recurso y su importancia en el desarrollo de la comunidad.

En la figura 38 se muestra una gráfica de crecimiento poblacional en la ciudad de Pereira durante los últimos años y se evidencia el aumento del consumo de agua y se observa la necesidad de conservación de las fuentes hídricas con fines de supervivencia a nivel de consumo humano, a esto se suma la necesidad de captar el agua para los procesos de generación de energía en las plantas hidráulicas de la Empresa de Energía de Pereira.

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

Figura 38. Crecimiento demográfico Pereira



Fuente: DANE (2017).

Tabla 6. Comportamiento de la demanda de recurso hídrico en Pereira

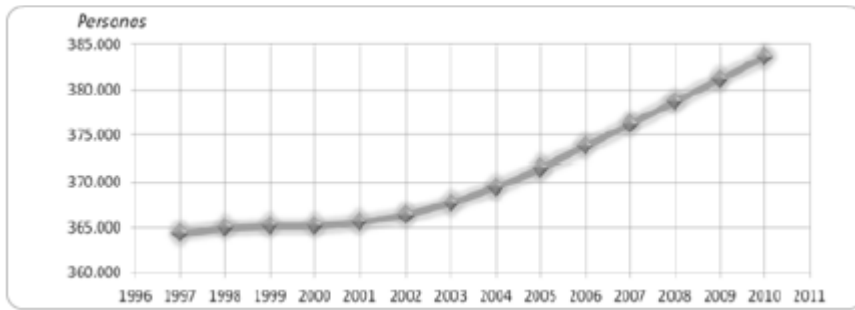
Año	Población		Servicio de Acueducto					
	Población Urbana	Con respecto al total (%)	Producción de Agua Potable (m ³ /mes)	Producción de AP Millones (m ³ /año)	Cobertura (%)	Suscriptores totales	Consumo suscriptor residencial (m ³ /mes)	Pérdidas (%)
1997	364.348	86,1	4.786.232	57.434.783	95,6	83.615	25,0	48,4
1998	364.956	85,8	3.605.354	43.264.252	-	86.515	22,0	36,5
1999	365.175	85,4	3.608.478	43.301.739	94,0	86.072	20,0	40,6
2000	365.165	85,0	3.691.634	44.299.607	97,5	88.857	19,2	41,6
2001	365.583	84,6	3.582.409	42.988.903	-	91.513	18,2	41,6
2002	366.361	84,3	3.552.209	42.626.512	-	93.824	18,2	42,2
2003	367.661	84,0	3.653.740	43.844.881	98,4	96.851	18,5	36,6
2004	369.387	83,9	3.641.799	43.701.591	98,1	99.480	18,4	34,2
2005	371.439	83,8	3.613.952	43.367.427	97,2	102.267	18,1	34,0
2006	373.762	83,8	3.418.587	41.023.047	97,6	105.222	17,8	34,1
2007	376.187	83,8	3.354.986	40.259.831	95,4	109.080	17,1	35,6
2008	378.663	83,8	3.083.285	36.999.414	99,0	113.649	16,2	31,8
2009	381.150	83,9	2.973.048	35.676.571	100	116.953	15,8	29,9
2010	383.632	84,0	2.777.206	33.326.470	104	121.598	14,8	30,7

Fuente: Subgerencia comercial y de ingeniería de la EAAP, Aguas y aguas de Pereira S.A. (2017).

De acuerdo con la tabla 6, se observa una relación respecto a la necesidad de los servicios públicos de acueducto y alcantarillado teniendo en cuenta que la fuente de suministro es el mismo río en todos los años y los factores de temperatura y demás afectaciones han ocasionado que el recurso sea finito y sensibilice a la población a implementar herramientas que permitan monitorear, optimizar y pronosticar los escenarios futuros en relación de la disponibilidad de las fuentes hídricas de la región.

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

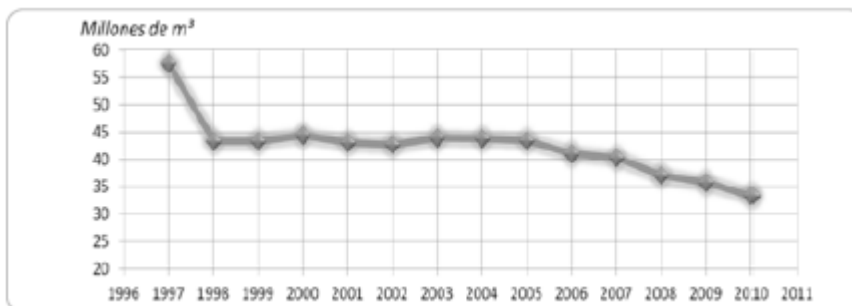
Figura 39. Comportamiento histórico de consumo mensual de agua



Fuente: DANE (2017).

De acuerdo con la figura 39 se observa de manera clara y evidente la tendencia alcista respecto a que con mayor número de personas hay un mayor consumo del líquido.

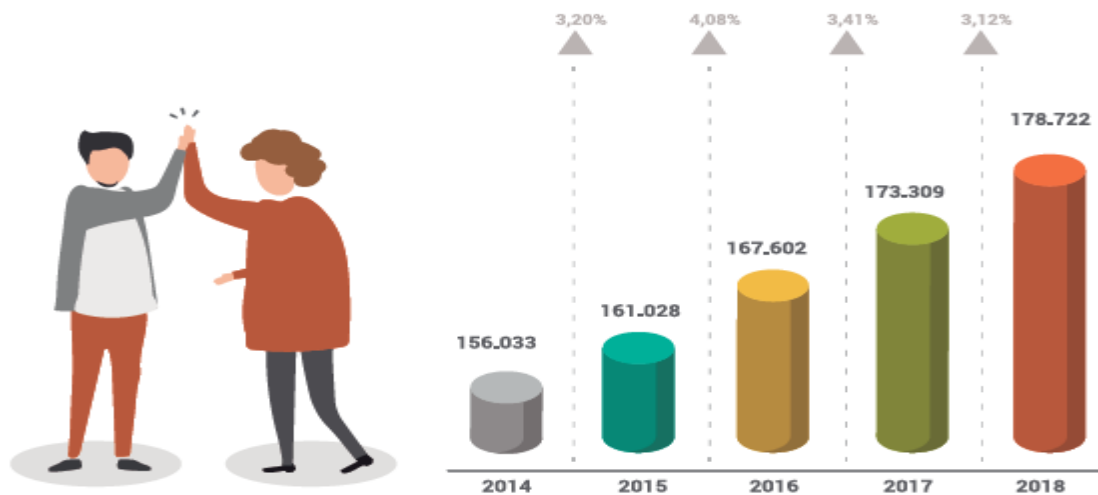
Figura 40. Comportamiento histórico producción de agua en Pereira



Fuente: DANE (2017).

En la figura 40 se observa una tendencia a la disminución de la producción de agua en la ciudad de Pereira desde el año 1996 al año 2011, así mismo, como se puede observar en las gráficas hay una relación inversa entre el comportamiento creciente de población y la tendencia de disminución de producción de agua lo cual afecta directamente los recursos para generación de energía que se puede proyectar a futuro un desabastecimiento de fuente de suministro para sostener el consumo de la población y la generación de energía mostrando una clara necesidad de análisis de la información en la cual se pueda proyectar la disponibilidad del recurso y generar conciencia para el control poblacional, optimización de consumo, preservación del mismo y control de las variables que afectan el caudal del río Otún.

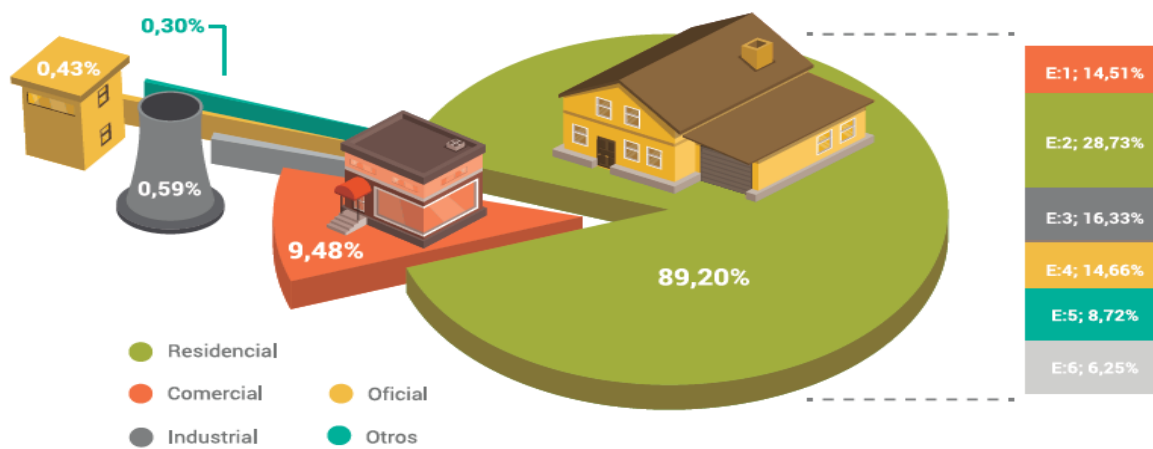
Figura 41. Evolución Usuarios Energía



Fuente: EEP (2019).

Se muestra en la gráfica el crecimiento de usuarios año tras año desde el 2014 observándose un crecimiento de más de 20.000 usuarios en 4 años lo que representa la necesidad de cobertura de la compañía en cuanto a infraestructura y necesidad de suministro de energía eléctrica, con esta tendencia se evidencia un crecimiento al alza en los próximos años en cantidad de usuarios y la necesidad de implementar planes de control.

Figura 42. Participación total de usuarios año 2018

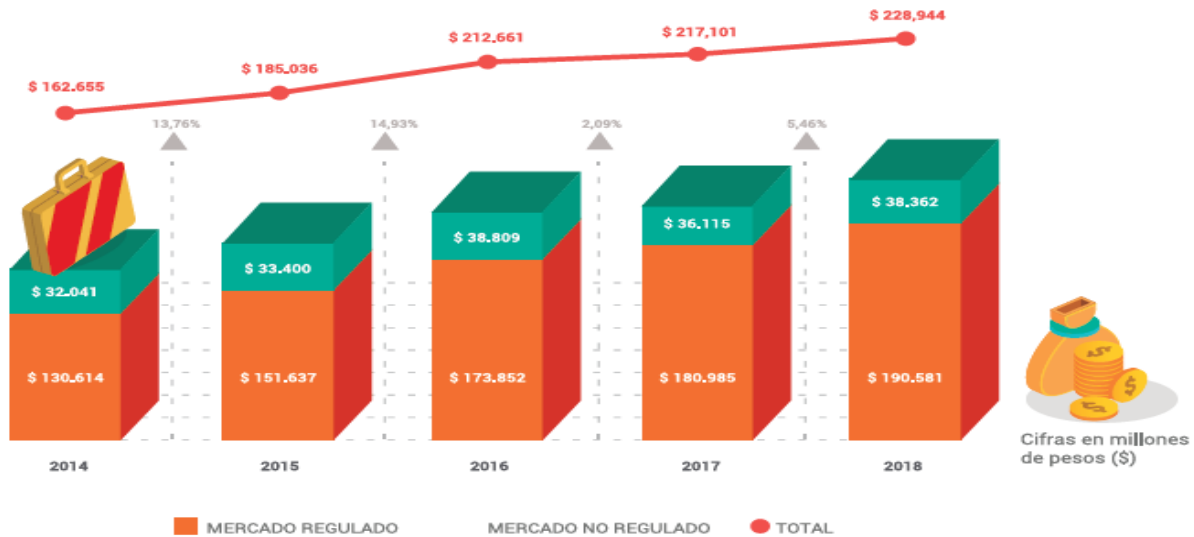


Fuente: EEP (2019).

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

Se observa de acuerdo con la gráfica una participación del 89,20% reflejado en los usuarios residenciales dentro del total de consumo de energía para la ciudad lo cual es una parte importante referente a las proyecciones de consumo según el crecimiento poblacional analizado en anteriores graficas.

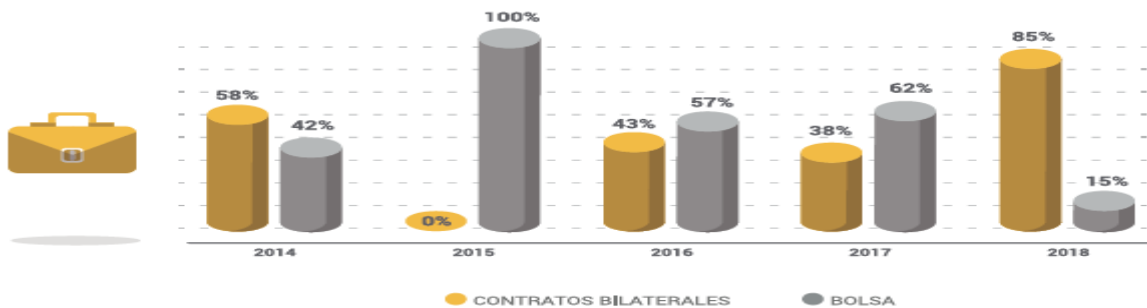
Figura 43. Comparativo Facturación 2014 - 2018



Fuente: EEP (2019).

Las cifras con respecto a la facturación de energía en la anterior grafica además de ser ocasionadas por el crecimiento de usuarios también es impactada por la variación del precio del Kw/h cuyo precio es fijado según el operador de red para el mercado regulado.

Figura 44. Ventas energía Mercado No Regulado EEP

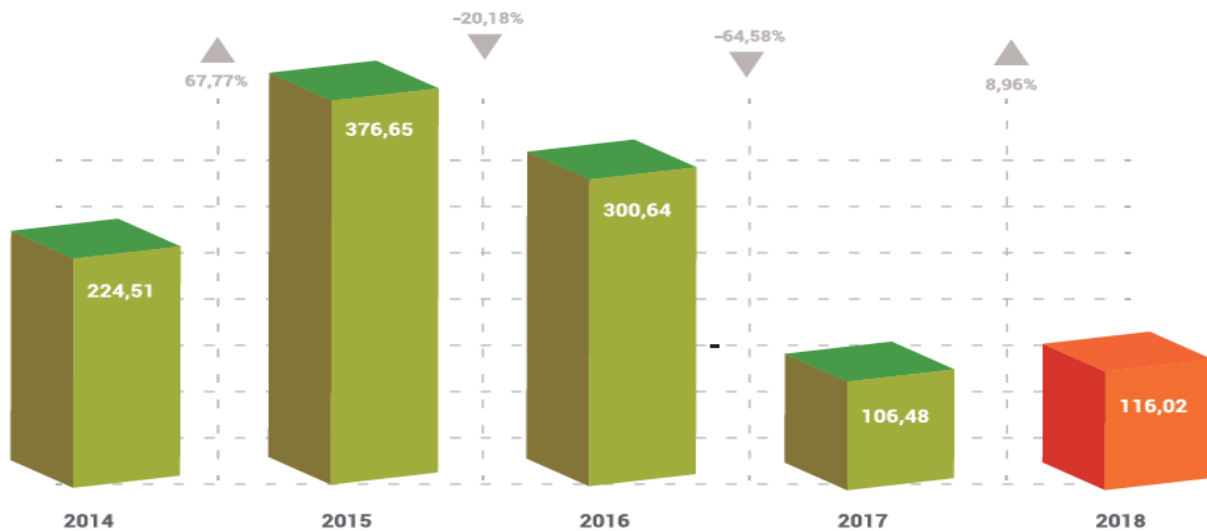


Fuente: EEP (2019).

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

De la gráfica podemos observar que existe una gran variación en cuanto a las ventas de energía al mercado no regulado, la intención de la compañía es presentar una baja exposición al precio en bolsa y estar cubiertos mediante contratos bilaterales para obtener una estabilización del precio y menor riesgo por la incertidumbre que se da de acuerdo a los factores climáticos a nivel nacional, al contar con métodos de pronóstico que permitan disminuir la incertidumbre podrá ofrecer tarifas competitivas para los contratos bilaterales a largo plazo con los usuarios del mercado no regulado, en el caso del año 2015 refleja que no se hicieron contratos y presento un 100% de exposición a precios de bolsa lo que pudo ocasionar debilidad en el manejo financiero de la compañía para esa fecha.

Figura 45. Comportamiento precio en bolsa 2014 - 2018

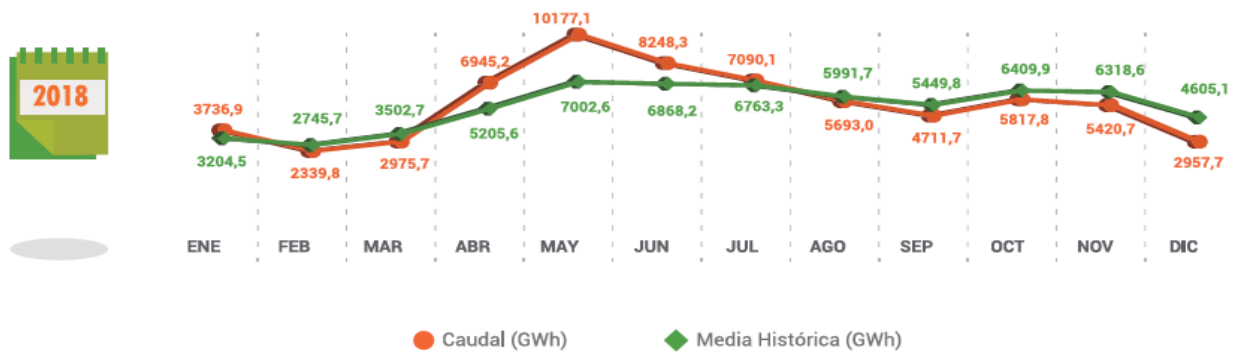


Fuente: EEP (2019).

La figura 45 muestra como las variaciones dadas reflejan el comportamiento del precio Kw/h nacional promedio por año, un precio en bolsa bajo significa mayores beneficios para los operadores de red indicando que hay eficiencias en los niveles de los embalses a razón de la generación de energía hidráulica impactado principalmente por los grandes generadores del país.

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

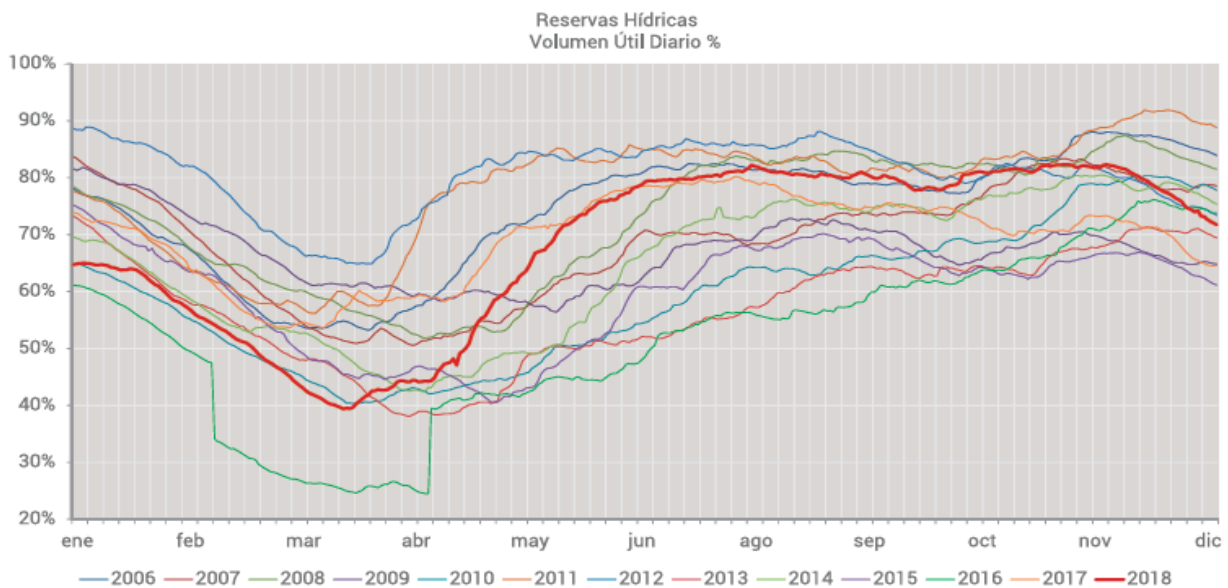
Figura 46. Aportes hídricos del SIN



Fuente: EEP (2019).

En la figura 46 podemos ver a nivel nacional los aportes que se realizan para generación hidráulica desde el SIN (Sistema Interconectado Nacional) y su comportamiento según las diferentes temporadas del año.

Figura 47. Evolución de los embalses



Fuente: XM S.A ESP (2019).

De acuerdo con la figura 47 el nivel de los embalses y su comportamiento determina la relación de los precios en bolsa dentro de una de sus componentes en términos tarifarios, en rojo resaltado se observa las reservas del 2018.

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

En el análisis realizado según la información suministrada por la compañía y las entrevistas con los líderes del proceso comercial y área técnica se revisa las condiciones de la concesión de agua para las plantas de generación o PCH lo cual se muestra en la tabla 7 con la siguiente información.

Tabla 7. Caudales Permitidos

<u>Resolución CARDER 1668 2016</u>		
	Planta Nuevo Libare	Planta Belmonte
Caudal máximo	7.200 L/s	Sin Restricción
Caudal Consumo Humano	2.350 L/s	
Caudal Ecológico	1.800 L/s	1.800 L/s

Fuente: Elaboración propia con información EEP

La concesión de agua para la Planta Nuevo Libaré es regida por la Resolución 1668 de 2016, emitida por la Corporación Autónoma Regional de Risaralda (CARDER), que concluye en permitir 7.200 l/s como caudal máximo para la generación en esta Pequeña Central Hidroeléctrica (PCH), siempre que se respete y garantice el caudal concesionado para consumo humano para las dos empresas de acueducto que se sirven de este mismo sistema (2.350 l/s). También se debe respetar un nivel de caudal ecológico mínimo de 1.800 l/s para una restricción total de 4.150 l/s.

La Planta Belmonte de acuerdo con la misma Resolución permanecen intactas las condiciones, de modo general las condiciones climatológicas anuales para el año 2018 fueron similares a las del 2017 con un clima beneficioso en cuanto a la generación de energía en la PCH Nuevo Libare dado que se presentó temporadas de alta pluviosidad en la cabecera del río Otún, esta información se obtuvo de los medidores de caudal los cuales muestran seguimiento útil para el proceso de generación.

En la figura 48 se muestra una pantalla de la página web donde se realiza el monitoreo de los sensores de caudal instalados en diferentes zonas del río Otún y que suministra la información para los análisis de la información requerida en cuanto al comportamiento de las variables y el seguimiento al caudal ecológico, con la información obtenida de los sensores y monitoreada por la compañía en línea se

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

generan reportes que son emitidos al ente regulatorio, así mismo con esta información se procede a tener el insumo para análisis estadístico y proyecciones respecto a las condiciones de generación de energía en las dos plantas PCH.

Figura 48. Software usado para control de la red hidro-climatológica



Fuente: www.redhidro.org (2019).

A continuación en la tabla 8 se muestra los datos de caudales recopilados de acuerdo a la información suministrada por la compañía y descargados de la plataforma que registra los datos de los sensores de caudal instalados en la ciudad, en la tabla se observa la variación que existe en cuanto a la disponibilidad del recurso hídrico en cada una de las mediciones realizadas por los sensores, en la última columna se observa el promedio general diario mostrando una alta variación en cada uno de los días del mes, así mismo en cada mes se puede obtener información de las 3 mediciones diarias, con esta información se evidencia la necesidad de calcular y proyectar cuáles serán los niveles de caudal que permitan la generación de energía y prever las paradas de planta para eventos de mantenimiento según los niveles de caudal.

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

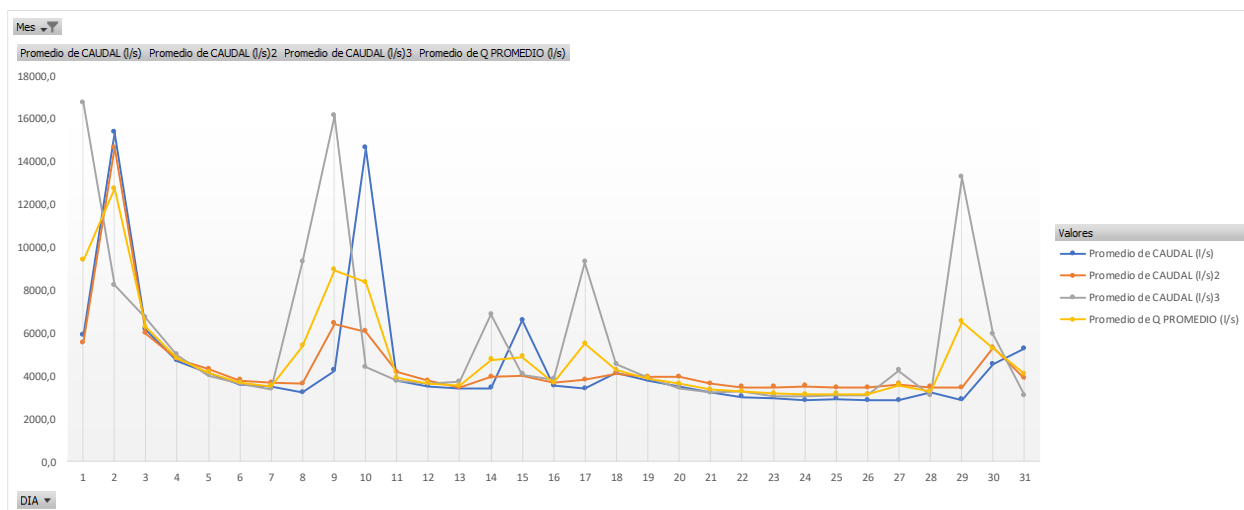
Tabla 8. Datos Caudal enero 2018

Mes	Valores			
DIA	Promedio de CAUDAL (l/s)	Promedio de CAUDAL (l/s)2	Promedio de CAUDAL (l/s)3	Promedio de Q PROMEDIO (l/s)
1	5882,7	5557,0	16763,7	9401,1
2	15365,9	14667,6	8239,9	12757,8
3	6156,4	5986,3	6723,3	6288,7
4	4697,4	4809,4	4984,6	4830,5
5	4137,8	4310,6	4019,5	4156,0
6	3607,2	3796,3	3659,1	3687,5
7	3513,8	3674,3	3386,6	3524,9
8	3225,6	3640,9	9302,4	5389,6
9	4253,8	6447,7	16156,9	8952,8
10	14649,3	6078,7	4399,2	8375,7
11	3780,5	4186,5	3774,1	3913,7
12	3531,2	3773,0	3636,8	3647,0
13	3422,4	3460,5	3736,9	3539,9
14	3428,5	3948,3	6863,1	4746,6
15	6608,0	4018,7	4064,6	4897,1
16	3538,1	3684,0	3831,8	3684,6
17	3402,6	3817,8	9315,7	5512,0
18	4129,5	4119,3	4540,5	4263,1
19	3804,7	3943,3	3903,8	3883,9
20	3489,8	3959,3	3424,2	3624,4
21	3217,8	3624,1	3232,3	3358,1
22	3027,9	3475,8	3279,5	3261,1
23	2983,5	3466,3	3059,8	3169,9
24	2856,4	3513,1	3061,4	3143,6
25	2920,9	3444,3	3114,7	3160,0
26	2869,8	3449,8	3106,7	3142,1
27	2869,1	3614,2	4242,5	3575,3
28	3237,1	3472,1	3086,5	3265,2
29	2884,7	3463,0	13273,2	6540,3
30	4537,9	5326,0	5946,8	5270,2
31	5277,7	3881,7	3085,6	4081,7
Total gen	4558,3	4471,3	5587,6	4872,4

Fuente: Elaboración propia

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

Figura 49. Comportamiento enero 2018 Caudales



Fuente: Elaboración propia

En la figura 49 se observa el comportamiento de los niveles de caudal durante el mes de enero de 2018, se refleja una alta variación del comportamiento de la principal fuente de abastecimiento dentro del proceso.

Tabla 9. Resumen Caudales 2018 Bocatoma Libare

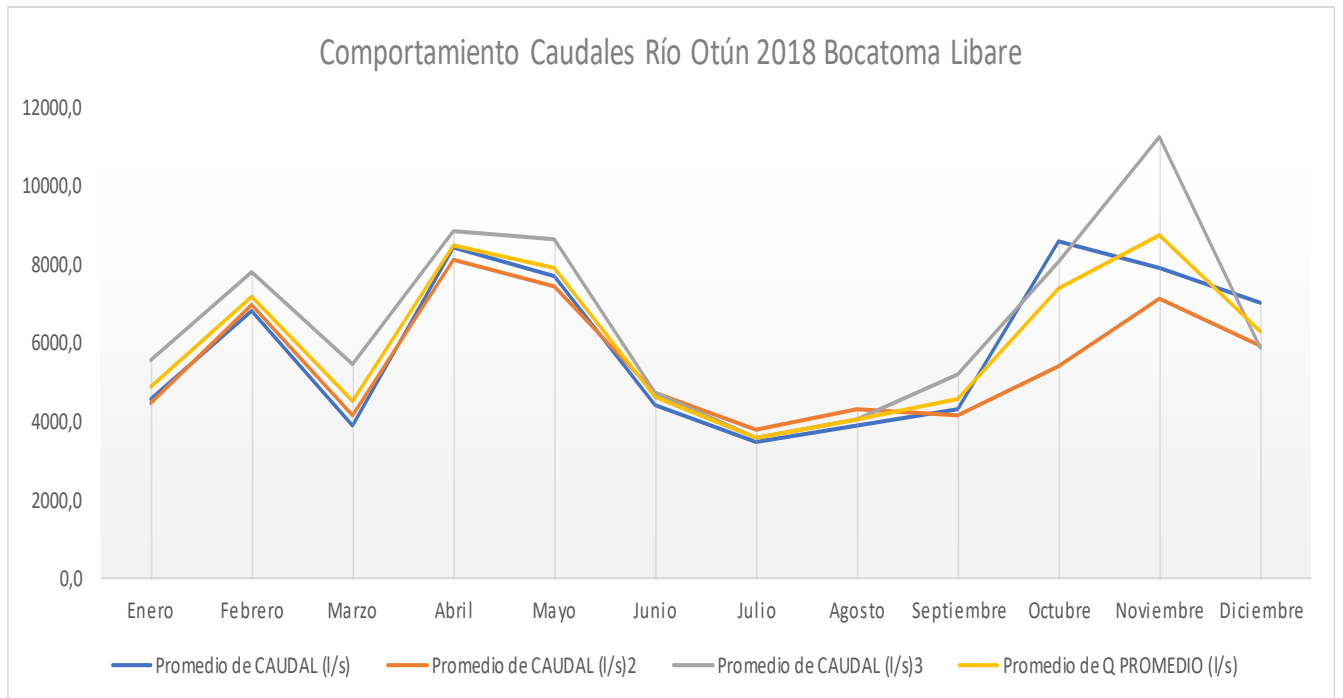
Mes	Promedio de CAUDAL (l/s)	Promedio de CAUDAL (l/s)2	Promedio de CAUDAL (l/s)3	Promedio de Q PROMEDIO (l/s)
Enero	4558,3	4471,3	5587,6	4872,4
Febrero	6810,5	6972,1	7813,0	7198,5
Marzo	3912,4	4150,7	5453,1	4505,4
Abril	8452,1	8139,2	8868,5	8486,6
Mayo	7706,7	7432,6	8659,5	7932,9
Junio	4392,5	4752,4	4747,2	4630,7
Julio	3457,9	3767,3	3597,7	3607,6
Agosto	3884,4	4310,3	4035,7	4076,8
Septiembre	4327,2	4176,2	5183,3	4562,2
Octubre	8615,1	5436,4	8076,1	7375,9
Noviembre	7910,2	7114,5	11240,3	8755,0
Diciembre	7029,5	5927,0	5900,2	6285,6

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 9 se observa los datos promedio de caudales registrados durante 2018 por el sensor de caudal instalado en la bocatoma nuevo Libare, durante todo el año se observa fuertes variaciones sin embargo hay un comportamiento general con tendencia a la disminución con afectación en los niveles de generación de energía.

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

Figura 50. Comportamientos caudales 2018



Fuente: Elaboración propia

En la figura 50 podemos visualizar 4 líneas de comportamiento, en la información obtenida por los sensores se presentan 3 registros para este informe, cada 8 horas se genera un reporte cubriendo las 24 horas del día, promedio caudal se refiere al informe de las primeras 8 horas, caudal 2 es el reporte del promedio a las 16 horas, el caudal 3 es el promedio de reporte a las 24 horas y la última Q promedio es el reporte del promedio día dando así registros periódicos sobre el comportamiento del caudal para generación de energía teniendo en cuenta las restricciones en cuanto a caudal ecológico y el caudal necesario para consumo humano, dando como resultado que para el proceso de generación se requiere que el caudal este por encima de 4.150 L/s (Litros por segundo), o 4,15 metros cúbicos por segundo.

En la tabla 10 podemos observar los promedios de caudal registrados en las mediciones desde el año 2014 al 2018 y posterior a esto evidenciar el comportamiento de estos según las temporadas invernales y las afectaciones climáticas del sector.

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

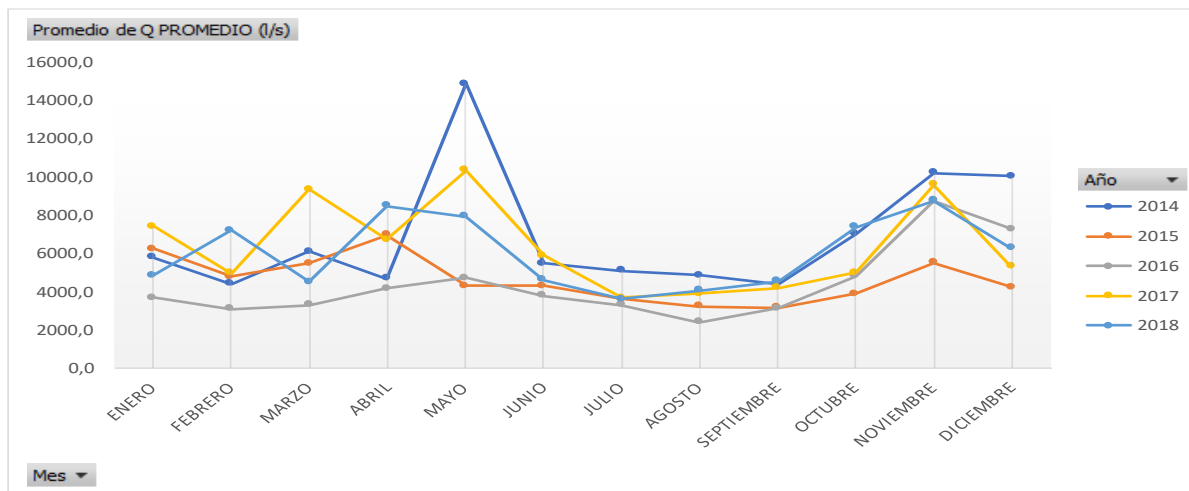
Tabla 10. Promedios caudales por año 2014 - 2018

Promedio de Q PROMEDIO (l/s)	Etiquetas					
Etiquetas de fila	2014	2015	2016	2017	2018	Total general
ENERO	5796,8	6246,0	3681,5	7414,6	4872,4	5602,2
FEBRERO	4397,9	4795,4	3085,5	4961,2	7198,5	4874,9
MARZO	6098,5	5493,6	3305,8	9355,3	4505,4	5751,7
ABRIL	4689,8	6968,7	4161,2	6745,0	8486,6	6210,2
MAYO	14887,7	4321,2	4719,1	10343,2	7932,9	8440,8
JUNIO	5497,9	4316,2	3798,7	5886,5	4630,7	4826,0
JULIO	5088,0	3623,0	3305,3	3679,1	3607,6	3860,6
AGOSTO	4874,4	3244,4	2412,2	3900,6	4076,8	3701,7
SEPTIEMBRE	4390,3	3180,5	3122,7	4202,4	4562,2	3891,6
OCTUBRE	7046,0	3905,8	4833,1	5012,3	7375,9	5668,7
NOVIEMBRE	10204,6	5517,9	8719,9	9587,3	8755,0	8640,2
DICIEMBRE	10040,2	4229,0	7286,1	5322,2	6285,6	6632,6
Total general	6946,3	4645,1	4369,9	6376,4	6008,1	5672,4

Fuente: Elaboración propia

La variabilidad de los registros mostrada en la tabla 10 se da principalmente por las afectaciones climáticas que impactan los ríos de acuerdo con las épocas del año y los fenómenos climáticos como El niño y La niña.

Figura 51. Comportamientos caudales 2014 - 2018



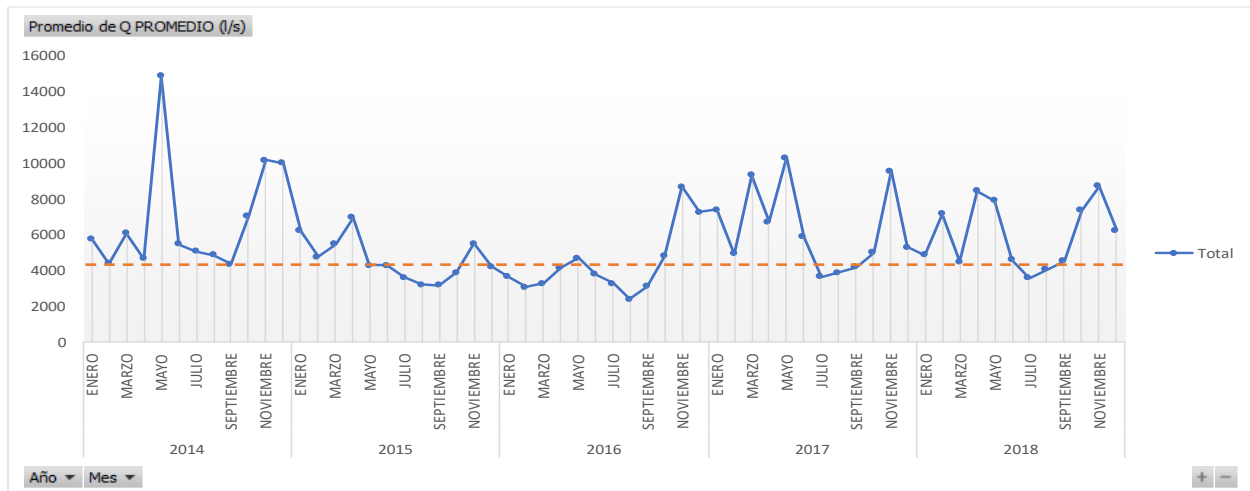
Fuente: Elaboración propia

La figura 51 muestra el comportamiento de los caudales del río Otún desde el año 2014 hasta el 2018 mostrando una correlación entre las épocas de invierno y el nivel de

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

caudal, así mismo se observa que para el año 2018 los niveles de caudal son inferiores y los más altos se muestran para el año 2014 encontrándose una tendencia a disminución de nivel.

Figura 52. Tendencia historia caudales



Fuente: Elaboración propia

En la figura 52 podemos evidenciar el comportamiento y los efectos en una línea temporal, de acuerdo con la imagen, se observa algunos meses donde el promedio quedo registrado un caudal por debajo de las restricciones para los procesos de generación de energía en la PCH Libare. En el análisis de la información recopilada y con base en la información histórica registrada con los sensores para la generación de energía en la planta Nuevo Libare se denota la necesidad de realizar pronósticos de comportamiento del caudal de río, basados en los métodos más completos y aplicados al sector eléctrico dado su complejidad se plantea la opción de realizar modelos basados en técnicas ARIMA, dado que la técnica ya se ha aplicado a otros estudios relacionados en el marco teórico y que se cuenta con suficiente información histórica en las bases de datos además de la facilidad para consecución de la misma ya que existen las herramientas para el suministro por medio de los sensores ubicados en la ciudad y además se puede lograr obtener un modelo dinámico que se alimente a diario y pueda estar proyectando los datos probabilísticos que permitan la toma de decisiones

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

con menor nivel de incertidumbre, entre las decisiones más relevantes en impactos para la organización, estarían:

- ✓ Disminución de primas de seguros por mejora de siniestralidad relacionada con daños y correctivos al tener un plan de mantenimiento alineado a la planeación de generación.
- ✓ Impacto a nivel financiero obteniendo mejores utilidades por concepto de negociaciones con mayor precisión
- ✓ Decisiones acertadas de inversión en activos de generación.
- ✓ Mejora del Ebitda al optimizar los costos operativos por mantenimientos.
- ✓ Aumento en los ingresos por concepto de generación de energía hidráulica.
- ✓ Mejora en las relaciones internas y efectos del trabajo entre las áreas.
- ✓ Mejora en la comunicación y organización de procedimientos.
- ✓ Establecer una metodología de trabajo alineada al proceso de generación de energía.

8. PLAN DE INTERVENCIÓN Y PRUEBA PILOTO

Con la realización del diagnóstico por medio de las entrevistas y la información suministrada y recopilada en visitas de campo y la registrada por los sensores de caudal y los registros históricos a fin de identificar los impactos que se tiene por las variaciones del suministro de agua para los procesos de generación de energía y económicamente mostrar el impacto en los resultados financieros de la compañía así como la posibilidad de obtener un mejor resultado al disminuir la incertidumbre en la planeación de los procesos, a continuación con los resultados del diagnóstico y con el apoyo del marco teórico se muestra el plan de intervención a llevar a cabo.

Tabla 11. Plan de intervención

PROCESO	ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN	ACTUALIDAD	PROPUESTA DE MEJORA
TÉCNICA	Planeación de mantenimiento según estadísticas	Al momento de realizar el plan anual de mantenimiento considerando las paradas de planta tener en cuenta la información estadística y proyecciones de comportamiento del caudal	No se contempla la información del comportamiento de los caudales de río según los sensores y no se realizan proyecciones para determinar la viabilidad de las paradas de los equipos o planeación de los procesos de generación de energía.	Implementar el modelo de pronóstico que centralice la información y sea utilizado como herramienta para la planeación durante el proceso, tener en cuenta la información suministrada por el área ambiental para prever situaciones en las PCH.
COMERCIAL	Comunicación	Estar en constante comunicación con el área técnica para recibir información con respecto a la planeación y presupuesto de generación de energía y paradas de planta acorde con los comportamientos del caudal de río.	La información suministrada no es confiable dado que no se realizan análisis estadísticos ni proyecciones acertadas con respecto a los procesos de generación.	Enlazar sistemas de información de manera que se pueda tener información en tiempo real sobre los pronósticos de generación en las plantas y cruzar dichos datos con los planes de mantenimiento determinando las restricciones y siendo acertados en las decisiones de intervención en los equipos y activos que afecten los procesos de generación de energía.

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

FINANCIERA	Presupuesto	Presupuesto de inversiones	Las decisiones de inversión se soportan en análisis de la información presentada en el momento de cada proyecto, en lo relacionado con inversiones en equipos de generación de energía hidráulica no se tiene en cuenta los pronósticos en cuanto a caudal del río.	Incluir los informes e información del modelo de pronóstico de caudal en los proyectos que se llevan a cabo relacionados con las PCH
		Presupuesto de costos	No se tiene en cuenta el seguimiento a la ejecución de los proyectos con respecto a la viabilidad de compra según sea la necesidad respecto a los planes de intervención.	Incluir en el seguimiento de la ejecución presupuestal y los planes de mantenimiento información de proyecciones según los análisis de información histórica y modelos de pronóstico en las plantas de generación.
		Presupuesto de Ingresos	La información que se suministra con respecto a los presupuestos de ingresos presenta altos niveles de incertidumbre en lo que se refiere a ingresos por generación de energía y contratos con el mercado No regulado debido a que se presentan paradas de planta no proyectadas de acuerdo con las variaciones de los caudales de río.	Contar con acceso a modelo de pronóstico de caudal de río para la generación de energía en las plantas de generación para cruce de información y disminuir las variaciones en las proyecciones de ingresos.

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con el diagnóstico de la organización y el planteamiento de intervención a la compañía a fin de obtener análisis de la información estadística y el modelo de pronóstico para el caudal de río se presenta la siguiente formulación del plan e intervención cumpliendo con el enfoque de investigación – acción según (Hernández et al., 2014).

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

Tabla 12. Formulación plan de intervención

Oportunidad de mejora	Análisis de causas	Objetivos	Acción	Encargado	Fecha Inicio	Fecha final	Fecha de seguimiento	Efectividad
En el área técnica no se tiene en cuenta la información del comportamiento de los caudales de río según los sensores y no se realizan proyecciones para determinar la viabilidad de las paradas de los equipos o planeación de los procesos de generación de energía	La persona encargada de planeación de mantenimiento no cuenta con el acceso a la información y tiene sobre carga de trabajo que no le permite realizar la labor	Tener información en línea y estadística mediante un modelo que permita brindar alertas sobre posibilidades de no generación para la planeación de las paradas de planta	Brindar capacitación y accesos a los informes y análisis para lograr una correcta planeación	Profesional Ambiental	30/01/2019	30/06/2019	1/07/2019	100%
La información suministrada no es confiable dado que no se realizan análisis estadísticos ni proyecciones acertadas con respecto a los procesos de generación.	La información presentaba respecto a los niveles de generación de energía no contemplan análisis de información histórica y proyecciones de caudal	Contar con información confiable en el área comercial para disminuir los niveles de incertidumbre en la planeación de las transacciones	Presentar informes mensuales actualizados de acuerdo a los comportamientos de los niveles de generación de energía y las afectaciones con respecto a caudal de río	Profesional Técnico	30/06/2019	31/12/2019	1/07/2019	5% en ejecución

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

Las decisiones de inversión se soportan en análisis de la información presentada en el momento de cada proyecto, en lo relacionado con inversiones en equipos de generación de energía hidráulica no se tiene en cuenta los pronósticos en cuanto a caudal del río.	No se tiene en cuenta la importancia de la información hasta el momento de presentar un proyecto nuevo o cambio de equipo donde se justifica la inversión	Lograr tomar decisiones de inversión acertadas teniendo en cuenta las variables que pueden afectar los procesos	Brindar informes periódicos al área financiera sobre los riesgos del caudal para el proceso de generación de energía	Profesional Técnico	30/06/2019	31/12/2019	1/07/2019	5% en ejecución
No se tiene en cuenta el seguimiento a la ejecución de los proyectos con respecto a la viabilidad de compra según sea la necesidad respecto a los planes de intervención.	En la ejecución de los planes de mantenimiento no se programa las compras según fecha de ejecución de la obra, se tiene en cuenta compra para almacenar hasta la oportunidad en la ejecución	No invertir dinero en compra de equipos o materiales de manera anticipada sino cuando la labor se vaya a ejecutar de forma sincrónica con las proyecciones de paradas de planta	Realizar control de las compras según la fecha real de ejecución evitando acumulación de dinero en inventario	Profesional Compras	30/06/2019	31/12/2019	1/07/2019	5% en ejecución
La información que se suministra con respecto a los presupuestos de ingresos presenta altos niveles de incertidumbre en lo que se refiere a ingresos por generación de energía y contratos con el mercado No regulado debido a que se presentan paradas de planta no proyectadas de acuerdo con las variaciones de los caudales de río.	No se tiene herramienta de análisis de información estadística que permita ofrecer alto nivel de confianza en los presupuestos de ingresos con respecto a la generación de energía	Tener control sobre los indicadores financieros que permitan generar confianza en las decisiones de transacciones en el mercado No regulado	Entrega de informes mensuales sobre comportamiento y proyecciones cruzando información del área técnica comercial y financiera realizando análisis de caudal por medio de modelo de pronóstico con método ARIMA	Subgerencia Administrativa	30/06/2019	31/12/2019	1/07/2019	5% en ejecución

Fuente: Elaboración Propia a partir de (Hernández et al., 2014).

8.1. PRUEBA PILOTO

Para la realización de la prueba piloto acorde con el plan de intervención en la última actividad del cuadro de la tabla 12, se procede a realizar el análisis de información estadística aplicando modelo de pronóstico de caudal de río Otún con la metodología seleccionada ARIMA la cual se describe a continuación.

Con los modelos ARIMA (AutoRegresive Integrated Moving Average), que deriva de sus 3 componentes AR (Autoregresivo), I (Integrado) y MA (Medias Móviles), se estudian las series de tiempo desde un punto de vista estocástico o moderno que utiliza métodos más complejos y su aplicación requiere de series de tiempo largas, Box y Jenkins han desarrollado modelos estadísticos para series temporales que tienen en cuenta la dependencia existente entre los datos, esto es, cada observación en un momento dado es modelada en función de los valores anteriores, los análisis se basan en un modelo explícito.

El modelo ARIMA permite describir un valor como una función lineal de datos anteriores y errores debidos al azar, además, puede incluir un componente cíclico o estacional, es decir, debe contener todos los elementos necesarios para describir el fenómeno. Box y Jenkins recomiendan como mínimo 50 observaciones en la serie temporal.

Las observaciones ordenadas en el tiempo son llamadas serie de tiempo; para pronosticar series de tiempo cíclicas la estructura probabilística básica de la serie no debe cambiar en el tiempo, debido a que las leyes que rigieron en el pasado serán diferentes a las del futuro, luego, para pronosticar una serie lo mínimo que debería cumplir es que su media y su covarianza sea estable en el tiempo, así, se tendrá que definir que para el análisis de serie de tiempo el proceso sea estocástico estacionario (media y varianza constante en el tiempo), no estacionario (comportamientos aleatorios), de raíz unitaria (test alterno para identificar estacionariedad o integrados) cuando una serie de tiempo no estacionaria debe diferenciarse “d” veces para convertirla en estacionaria, se dice que es integrada de orden “d” en economía normalmente son estacionarias de orden 1.

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

Una vez hecha la prueba gráfica para observar tendencias e identificar si es o no estacionaria, se procede a hacer pruebas más formales como la de función de autocorrelación (ACF) donde coeficientes de correlación altos identifican la no estacionariedad de la serie de tiempo. Una regla consiste en obtener la ACF hasta una tercera o cuarta parte de los valores de la serie de tiempo, es decir, si se tienen 100 observaciones, se tomarán solo 33 observaciones (Holton & Keating, 2007).

Para escoger el modelo se postula cinco enfoques para la predicción basados en series de tiempo: (i) métodos de alisamiento exponencial, (ii) los modelos de regresión uniecuacionales, (iii) los modelos de regresión de ecuaciones simultáneas, (iv) los modelos autorregresivos integrados de media móvil (ARIMA) y (v) los modelos de vectores autorregresivos (VAR).

La metodología ARIMA, del acrónimo inglés (Autoregressive Integrated Moving Average) procede de los siguientes elementos:

AR, proceso autorregresivo: proceso aleatorio para casos generales de variabilidad en el tiempo.

I, integrado: una serie de tiempo es integrada de orden 1 (es decir, I (1)) si sus primeras diferencias son estacionarias, en forma similar, si una serie de tiempo es I(2), su segunda diferencia es estacionaria, por consiguiente, se debe diferenciar una serie de tiempo "d" veces para hacerla estacionaria y luego aplicar un modelo ARMA (p, q), se dice que la serie es ARIMA (p, d, q), es decir, una serie de tiempo autorregresivo integrada de media móvil, donde "p" son los términos autorregresivos, "q" los términos de media móvil y "d" el número de veces que la serie de tiempo debe ser diferenciada para hacerla estacionaria.

MA, (Moving Average) media móvil: se calcula para suavizar la volatilidad de una serie de datos mediante el promedio de subconjuntos de la serie completa.

ARIMA tiene el énfasis en el análisis de las propiedades probabilísticas, o estocásticas de las series de tiempo.

La mayoría de las series de tiempo son estacionarias en el sentido en que la media y la varianza son constantes y la covarianza es invariante en el tiempo. La mayoría de las series económicas no son estacionarias, por ello se requiere

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

diferenciarlas, este documento estudiará los modelos ARIMA por tres razones principales:

- I. Fácil metodología, en donde se incluyen procesos matemáticos y estadísticos.
- II. La aplicación empírica que tienen estos modelos para inferir a partir de situaciones muestrales.
- III. Estos modelos han demostrado una eficiencia en la predicción de las series en el corto plazo.

Los modelos ARIMA no consideran a las variables independientes en su construcción, emplean información que se encuentra en la misma serie para generar los pronósticos, los modelos ARIMA dependen de los patrones de autocorrelación que existen en los datos (Holton & Keating, 2007).

El objetivo de la metodología de Box Jenkins es identificar y estimar un modelo estadístico que pueda ser interpretado como generador de la información muestra, el método Box-Jenkins utiliza una estrategia iterativa para construir los modelos, que consiste en seleccionar un modelo inicial mediante la estimación de los coeficientes del modelo y el análisis de los residuales.

Si es necesario, el modelo inicial se modifica y el proceso se repite hasta que los residuales indiquen que no es necesario seguir modificando, finalmente, el modelo ajustado se utiliza para el pronóstico. Para seleccionar un modelo ARIMA, se parte de un modelo de pocos parámetros, la necesidad de parámetros adicionales será evidente con un análisis de las autocorrelaciones residuales y de autocorrelaciones parciales.

Por otra parte, si los parámetros de un modelo ARIMA no son significativos, será necesario ir anulando parámetro por parámetro a la vez y ajustando el modelo.

Selección de datos para la prueba: De acuerdo con la teoría para la aplicación del modelo ARIMA, se procede a relacionar los datos históricos obtenidos de las bases de datos de la compañía, estos como insumo de entrada para la aplicación del método seleccionado, en la tabla 13 se detalla la información recopilada desde el año 1965 hasta 2005, esto para dar inicio al primer análisis histórico del modelo.

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

Tabla 13. Series históricas de caudal río Otún

AÑOS	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	VRANUAL
1965	10,20	8,40	8,10	14,40	18,00	8,80	6,30	5,80	6,60	13,00	18,90	15,30	11,15
1966	9,70	8,30	8,40	10,20	10,80	12,10	9,00	8,00	8,00	13,40	21,40	25,70	12,08
1967	10,90	10,70	12,30	12,70	15,40	14,40	8,90	7,30	7,80	11,90	18,70	13,20	12,02
1968	9,50	11,80	10,90	13,90	10,60	11,40	9,20	7,20	9,50	16,20	18,00	18,70	12,24
1969	10,50	9,10	7,90	14,70	16,30	10,90	6,90	6,20	7,00	17,60	15,30	10,70	11,09
1970	8,60	9,30	10,10	11,80	16,20	11,60	7,70	6,60	8,70	18,70	20,80	13,80	11,99
1971	12,17	14,15	15,94	13,74	14,01	12,92	8,38	7,31	8,35	10,44	14,66	9,19	11,77
1972	15,64	15,18	17,73	18,64	20,19	16,60	9,39	8,17	9,41	11,52	16,97	14,87	14,53
1973	6,08	4,88	7,68	10,84	9,68	12,80	9,36	9,90	16,41	18,33	20,46	21,74	12,35
1974	20,89	23,31	28,30	25,66	17,22	9,47	7,85	7,96	11,15	20,08	20,57	12,32	17,07
1975	12,58	18,03	18,26	14,39	16,99	11,88	19,22	10,50	12,17	18,47	27,06	30,58	17,51
1976	14,80	17,03	16,02	17,19	14,38	12,26	6,88	5,96	6,25	19,77	16,09	11,06	13,14
1977	6,13	5,77	6,20	12,64	14,04	12,04	7,93	7,25	8,85	15,18	16,98	8,33	10,11
1978	11,90	4,97	8,15	16,00	12,78	7,55	6,64	4,27	5,38	8,32	15,00	16,30	9,77
1979	7,02	7,69	10,38	16,13	15,56	14,17	6,54	8,20	14,13	16,19	11,12	12,26	11,62
1980	11,70	11,59	9,01	11,24	11,22	8,22	4,97	3,78	5,10	11,78	11,61	12,54	9,40
1981	6,65	9,18	7,42	15,12	24,31	17,06	11,91	10,79	9,27	11,60	19,12	11,76	12,85
1982	17,70	17,09	16,16	23,52	21,30	12,30	8,49	6,44	9,15	14,67	17,50	18,09	15,20
1983	8,96	8,72	10,45	20,93	15,03	9,86	5,63	3,68	3,48	8,27	9,76	15,00	9,98
1984	15,34	12,28	7,15	12,59	18,48	11,51	7,59	6,70	11,86	10,77	15,70	6,22	11,35
1985	6,32	3,14	6,38	8,28	8,50	4,37	1,80	6,81	10,06	19,31	15,73	13,96	8,72
1986	14,72	15,20	11,72	15,48	14,13	10,18	6,56	4,56	5,37	18,79	14,97	7,59	11,61
1987	6,35	4,75	4,85	8,18	14,29	8,85	6,72	7,17	7,63	17,31	16,96	18,84	10,16
1988	9,19	10,94	12,41	14,40	13,95	15,76	13,02	14,47	18,08	23,66	29,66	26,28	16,82
1989	15,32	13,02	16,25	11,08	14,07	6,30	5,61	5,23	7,61	9,80	15,54	15,28	11,26
1990	7,64	10,25	13,38	15,90	13,99	6,15	5,39	4,34	4,96	14,05	16,47	19,50	11,00
1991	12,32	8,66	5,78	8,70	12,78	8,03	4,84	3,91	5,00	11,10	16,51	16,40	9,50
1992	10,34	8,30	7,52	8,86	10,27	8,56	6,66	5,42	6,19	5,85	12,71	15,24	8,83
1993	16,33	8,31	10,42	12,11	20,95	10,76	8,70	8,03	9,47	14,50	25,06	21,04	13,81
1994	8,32	9,91	19,65	21,28	12,53	7,38	6,89	5,71	6,86	16,30	12,63	11,17	11,55
1995	7,11	6,90	11,37	12,96	10,96	9,82	8,92	10,09	7,90	17,44	19,27	20,70	11,95
1996	9,50	3,90	6,70	8,20	12,60	6,00	3,80	3,90	5,86	9,70	4,70	4,00	6,64
1997	4,40	4,00	3,90	5,50	4,30	5,60	3,80	3,40	5,00	12,20	23,50	10,80	7,20
1998	7,90	10,00	12,40	17,80	20,40	11,10	11,20	9,50	10,90	18,40	25,10	21,90	14,72
1999	25,89	24,61	21,68	21,06	16,35	12,45	7,81	7,63	11,79	14,63	27,11	20,58	17,63
2000	17,70	12,32	15,06	16,02	16,39	15,92	8,18	8,61	13,27	14,58	13,93	14,56	13,88
2001	10,00	10,36	16,11	10,58	15,60	10,15	9,50	8,90	8,88	10,96	13,86	17,17	11,84
2002	11,54	8,21	12,27	21,36	11,97	12,67	6,81	7,02	9,10	14,78	16,39	16,01	12,34
2003	7,65	9,39	15,10	20,37	17,88	16,24	11,23	8,44	9,56	28,24	20,99	17,27	15,20
2004	12,22	4,55	5,71	10,52	13,09	8,54	12,42	5,41	6,66	7,46	15,02	12,50	9,24
2005	8,68	8,06	7,68	8,96	12,35	7,75	6,94	6,43	7,19	22,34	22,59	17,01	11,33
Medios	11,13	10,30	11,53	14,24	14,63	10,74	7,94	7,00	8,68	14,82	17,67	15,50	12,01
Máximos	25,89	24,61	28,30	25,66	24,31	17,06	19,22	14,47	18,08	28,24	29,66	30,58	17,63
Mínimos	4,40	3,14	3,90	5,50	4,30	4,37	1,80	3,40	3,48	5,85	4,70	4,00	6,64
Desv.Estánd	4,43	4,84	5,14	4,66	3,81	3,18	2,95	2,29	3,13	4,67	4,98	5,44	2,59

Fuente: Elaboración propia con información tomada de Energía de Pereira

Aplicación del método de análisis: Se realiza la aplicación del método de pronóstico al cuadro de información histórica para identificación de instrumentos estadísticos de prueba. Se tiene en cuenta inicialmente para llevar a cabo el desarrollo de la prueba piloto las bondades encontradas en el libro Pronósticos en los negocios con ForecastX basado en Excel de (Holton & Keating, 2007), donde se habla de diferentes métodos de pronósticos pero que según los datos estadísticos con que se cuenta en la compañía se considera la aplicación de modelos ARIMA con el software Forecastx incluido en el libro dando los siguientes resultados.

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

Figura 53. Modelo de pronóstico según análisis

Audit Trail - Statistics					
Accuracy Measures		Value	Forecast Statistics		Value
AIC		340,47	Durbin Watson (1)		2,07
BIC		348,71	Mean		12,11
MAPE		26,82%	Standard Deviation		5,05
R-Square		28,01%	Max		28,24
Adjusted R-Square		24,02%	Min		4,55
			Sum Squared Deviation		1.456,05
			Mean Square Deviation		25,10
Method Statistics		Value	Range		23,69
Method Selected		Box Jenkins	Ljung-Box		5,72
Model Selected		ARIMA(2,1,1) * (1,0,0)			

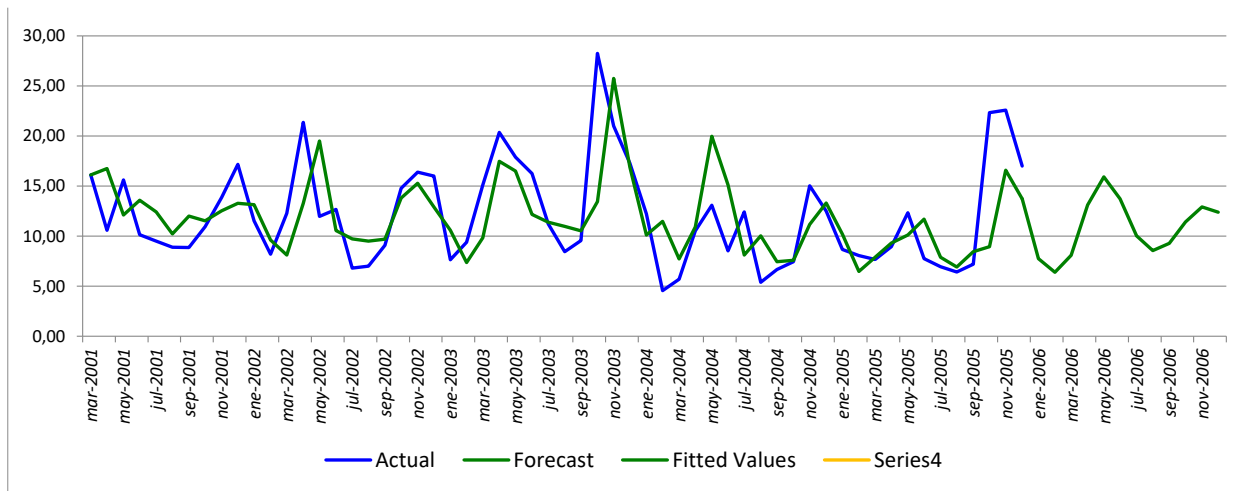
ForecastX Configuration Parameters	
Item	Value
Data range selected	[Caudales_Otun-ARMA.xlsx]Hoja5!\$A\$434:\$B\$493
Time scale for data	Monthly
Periods to forecast	12,00
Seasonal Length	1,00
Replace Outliers Activated	No
Replace Outliers Standard Deviations	
Replace Outliers Forecasting Technique	
Replace Missing Values	No
Replace Missing Values (Lower Limit)	
Replace Missing Values (Upper Limit)	
Remove Leading Zeroes	Yes
Remove Trailing Zeroes	No
Use Holdback Evaluation	No
Holdback Evaluation Period	
Apply Tracking Signal	No
Apply Tracking Signal (Under Forecast Percentage)	
Apply Tracking Signal (Over Forecast Percentage)	
Forecast Method Selected	Box Jenkins

Fuente: Elaboración propia a partir de software ForecastX.

En la figura 53 se observa los principales estadísticos de prueba (Durbin Watson 2,07 y Ljung-Box 5,72) los cuales muestran un ajuste del modelo, así mismo, se presentan otros estadísticos base con los cuales se revisa los márgenes de error de la prueba aplicada a la serie de datos.

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

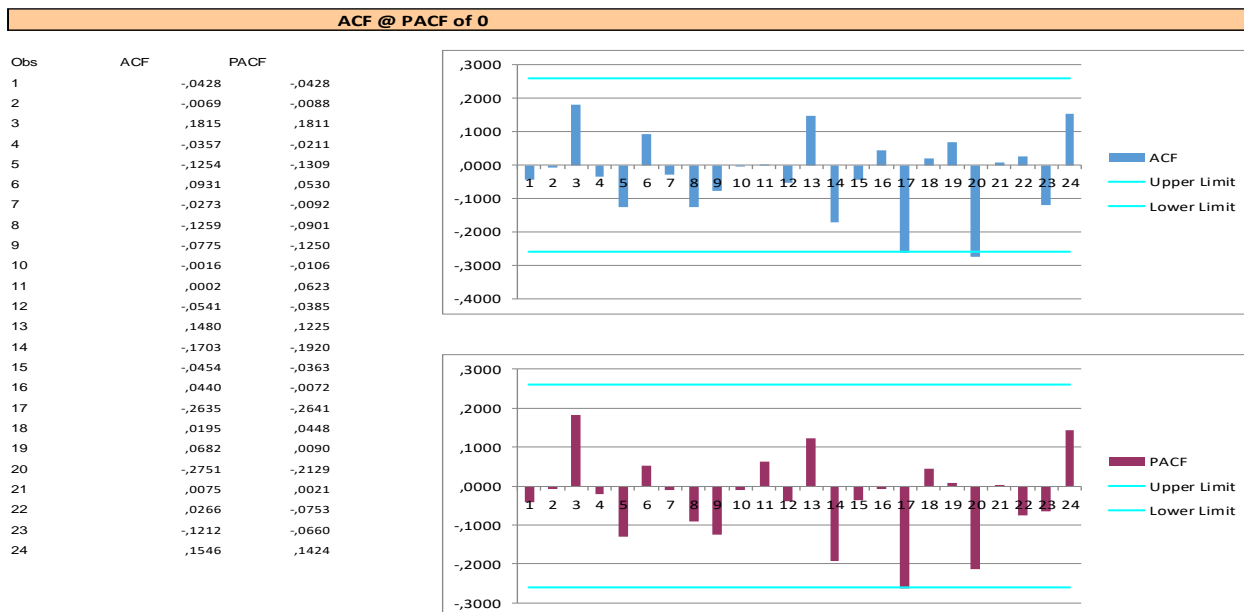
Figura 54. Gráfica modelo de pronóstico ARIMA



Fuente: Elaboración propia a partir de software ForecastX.

En la figura 54 se observa el comportamiento de los datos desde 2001 hasta 2005 y el resultado del pronóstico para 12 periodos del 2006 identificando en el modelo ARIMA datos de comportamiento útiles para el proceso de generación en su momento y que ahora se pueden utilizar para identificar las desviaciones del pronóstico.

Figura 55. Coeficientes de correlación del modelo

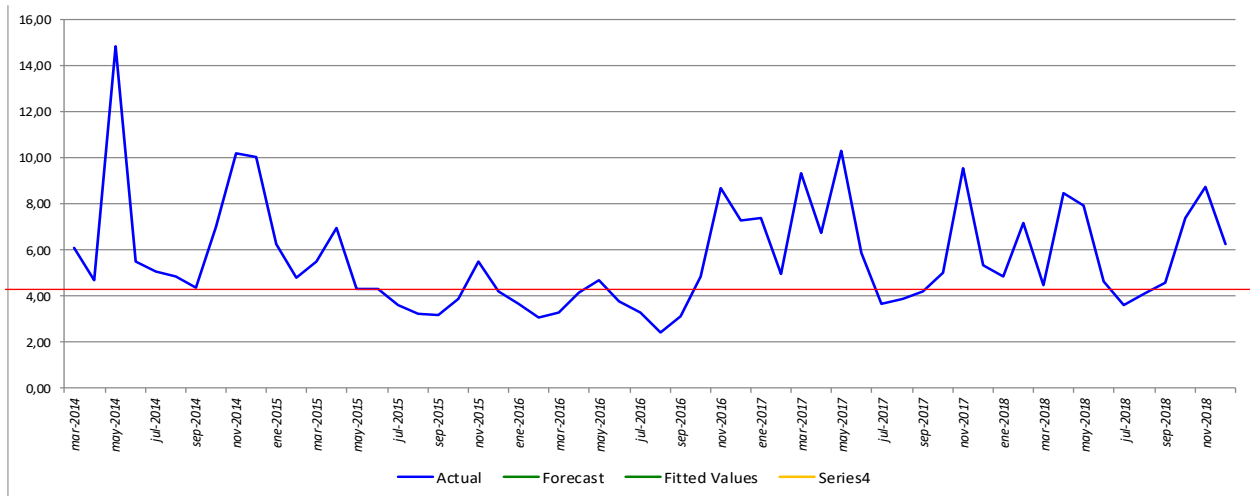


Fuente: Elaboración propia a partir de software ForecastX.

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

En la figura 55 se pueden observar los coeficientes de correlación y correlación parcial del modelo aplicado a las series de datos históricas con lo cual se observa que hay un ajuste en el método de pronóstico.

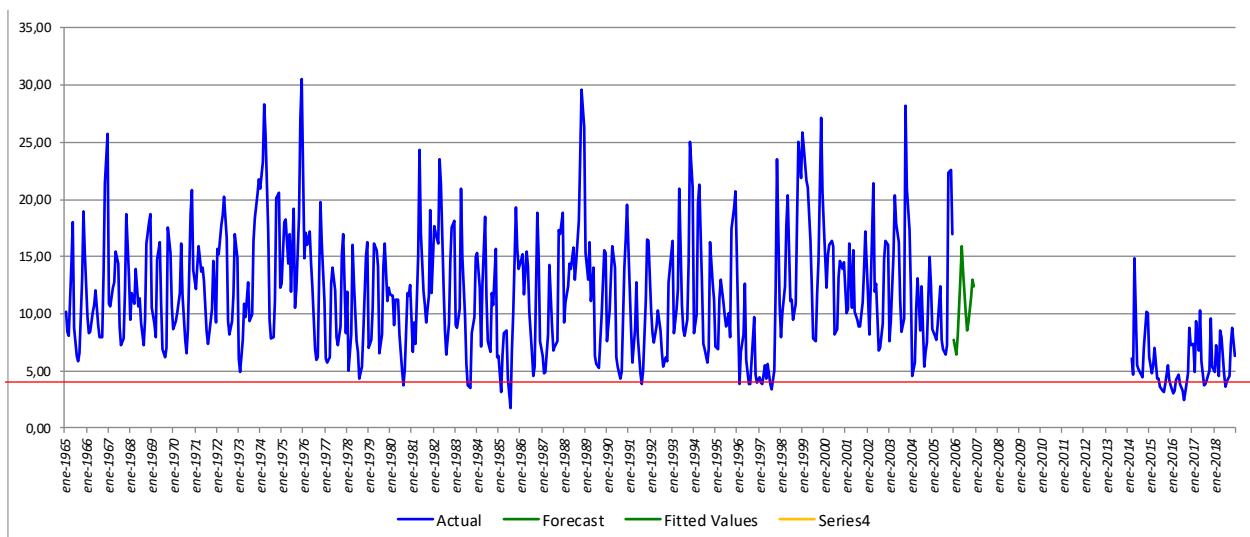
Figura 56. Análisis Caudal 2014 a 2018



Fuente: Elaboración propia a partir de software ForecastX.

En la figura 56 se observa la aplicación del modelo a los datos de los últimos 5 años donde se incluye en la línea roja la restricción de caudal para generación en la planta Libaré mostrando afectaciones probables al proceso de generación de energía.

Figura 57. Comportamiento Caudal 1965 - 2018



Fuente: Elaboración propia a partir de software ForecastX.

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

En la figura 57 vemos como de acuerdo con los datos resultantes de la aplicación del modelo y la inclusión de toda la serie histórica, se procede a incorporar la información de los últimos 5 años, es decir, 2015 a 2018 a fin de identificar las tendencias del comportamiento del caudal para suministro de información de ayuda para la planeación de la compañía, en la misma grafica se identifica la disminución del caudal con la tendencia desde 1965 hasta 2018 y en la línea roja se incluye la restricción del caudal ecológico para generación en la planta Libaré.

De acuerdo a la aplicación del método nos da como resultado que el modelo refleja un comportamiento de tipo ARIMA $(2,1,1)*(1,0,0)$ con los primeros 24 coeficientes de correlación dentro del rango lo cual indica que los pronósticos desarrollados con este modelo tienen un buen nivel de confianza y por lo tanto puede ser aplicable a otras series de datos del mismo tipo, esto básicamente indica que es posible realizar aproximaciones a los pronósticos de caudal del río utilizando modelos de tipo ARIMA dado que existe información disponible para realizar ejercicios más allá de la prueba piloto.

Se logra identificar con la aplicación del modelo de pronóstico que existe no solo una gran variación del caudal de río a través de los años, sino también que los riesgos por disponibilidad del recurso hídrico se vuelven mayores con el tiempo, las variables asociadas durante todo el desarrollo del trabajo ocasionan una disminución pronunciada en las gráficas en los niveles de caudal del río, la información obtenida después del análisis del modelo es fuente de consulta para los diferentes grupos de interés que ayudará a tomar decisiones del tipo empresarial y a nivel del municipio de Pereira un cambio de cultura en cuanto a planeación a largo plazo y la cultura de consumo y uso racional del agua, el ajuste del modelo ARIMA obtenido proporciona validez para su aplicación en el comportamiento de la información de caudal mes a mes y diario con la cual se podrá alinear los planes de mantenimiento a las proyecciones de niveles de caudal.

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- ✓ En el mundo de los negocios, en la vida diaria y en el sector social de manera general, constantemente se requiere el apoyo de las predicciones de eventos, en este caso los pronósticos como eslabón de la cadena de suministros ofrecen la ayuda que se requiere en cada campo para lograr estimar de manera muy acertada o con poco margen de error los datos necesarios para la toma de decisiones en cada industria, sin embargo es necesario lograr experticia para el desarrollo en la utilización de los métodos apropiados de pronóstico, no solo es la teoría estudiada sino también la habilidad de quien practica esta ciencia y la ayuda tecnológica, las compañías deben disponer de recursos para generar estudios o desarrollar áreas encargadas de calcular los pronósticos que permitan tomar las decisiones que anticipen el futuro y ayuden a ganar negocios o evitar costos en sus procesos, la cadena de abastecimiento en las compañías es apoyada por los modelos estadísticos, econométricos y los métodos de pronósticos, estos sistemas bien administrados permiten operaciones con mayores niveles de efectividad.

Basado en el desarrollo del proyecto, así como cada uno de los capítulos de la investigación, a continuación, se presentan las conclusiones que fueron estructuradas de acuerdo con el orden que se muestran los objetivos en el documento.

Podemos concluir que al presentarse la investigación se podría deducir que realmente si es viable disminuir la incertidumbre por medio de la utilización de métodos de pronósticos en el cual el modelo ARIMA aplicado puede ser eficiente de acuerdo con el correcto análisis de los datos estadísticos y la interpretación correcta de los resultados, sin embargo, no solo la utilización de modelos de pronóstico son necesarios para disminuir la incertidumbre e impactar positivamente la parte económica de la organización, también debe presentarse una correcta sincronía entre los análisis de datos, las programaciones de mantenimiento y adecuada operación de los activos de manera que los

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

mantenimientos programados estén alineados con los comportamientos del caudal del río Otún.

- ✓ Así mismo, después de realizar el diagnóstico a los procesos de generación de energía hidráulica y con la información recolectada se detecta una gran posibilidad de mejora en cuanto a la utilización de la información y el análisis para lograr una correcta planeación de los mantenimientos, es posible lograr mejores resultados al verificar los comportamientos del caudal de río y la información histórica aún sin tener un modelo de pronóstico, la información entregada desde el área técnica al área comercial en cuanto a las proyecciones de generación de energía no se basan en estudios profundos de análisis que brinden los niveles de confianza requeridos, con esta información el área comercial desarrolla su modelo de negocio y este a su vez impacta el área financiera con los presupuestos e indicadores financieros para los inversionistas, al desarrollar el modelo de análisis de información y pronóstico se logra brindar información confiable que impacta positivamente todo el proceso en la línea de generación de energía hidráulica.
- ✓ Para permitir un buen proceso de generación de energía no solo se requiere contar con buenos niveles de caudal de río sino también contar con recursos o herramientas para ejecutar las labores operativas de manera eficiente, así por ejemplo los tanques o bocatomas requieren de optimizar los procesos de limpieza y mantenimiento que garanticen disponibilidad en momentos de altos niveles de generación de energía.
- ✓ Acorde con los modelos de pronóstico aplicados se llega a la conclusión de que conocer los modelos de pronóstico no es suficiente para realizar los cálculos, también es necesario saber determinar y evaluar cuál es realmente el método de pronóstico adecuado según el comportamiento de los datos, además de obtener un gran apoyo en las herramientas tecnológicas se debe conocer los parámetros básicos necesarios para llevar a cabo un modelo eficiente de pronósticos que

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

minimice los márgenes de error, además de un modelo de pronóstico para optimizar las operaciones también se requiere conciencia y capacidad de análisis de la información por cada proceso para lograr una interpretación efectiva.

- ✓ Se logra llevar a cabo la simulación de modelos de pronóstico y análisis de la información estadística disponible en la compañía sin requerimientos de inversión desde el punto de vista financiero teniendo en cuenta que este ejercicio fue académico, sin embargo si es necesario a futuro realizar la inversión en un software de pronósticos para aplicación en diferentes procesos de la compañía, la aplicación de la propuesta se considera viable llevarla a cabo desde el punto de vista operacional facilitando mejoras a nivel interno de los procesos, de acuerdo con el plan de intervención se puede medir el indicador financiero Ebitda desde la aplicación de las mejoras propuestas y medir resultados en periodos de 1 año según los modelos de pronóstico para medir la eficiencia, además de la aplicación de los modelos de pronósticos también se requiere la conciencia del personal en las organizaciones para realizar el análisis de los datos y la información de manera que pueda aplicar recursos en función de la mejora de sus actividades diarias.

BIBLIOGRAFÍA

- Actualización del Balance Hídrico en los Municipios de Pereira, Dosquebradas, La Virginia, Santa Rosa de Cabal y Cartago. Informe final. Aguas y Aguas de Pereira. Universidad Nacional sede Medellín. Pereira, 2009.
- Agudelo, A., Lopez-Lezama, J., & Velilla, E. (2015). Predicción del Precio de la Electricidad en la Bolsa mediante un Modelo Neuronal No-Lineal Autorregresivo con Entradas Exógenas. *Información Tecnológica*, 26(6), 99-108.
- Aladro, Jose C. 2002. ANÁLISIS DE SISTEMAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA.
- Alarcón, Arturo D, El sector hidroeléctrico en Latinoamérica: Desarrollo, potencial y perspectivas, Banco Interamericano de desarrollo, 2018.
- Amjady, N. (2006). Day-Ahead Price Forecasting of Electricity Markets by a New Fuzzy Neural Network. *IEEE Transactions on Power Systems*, 21(2), 87-896.
- Anbazzhagan, S., & Kumarappan, N. (2013). Day-Ahead Deregulated Electricity Market Price Forecasting Using Recurrent Neural Network. *IEEE Systems Journal*, 7(4), 866-872.
- Arroyo-Madera, Y. (2010). Modelos de análisis de series de tiempo (arima y garch) aplicado a los precios de la bolsa de energía. Bogotá: Universidad de los Andes.
- Asafu-Adjaye, J. (2000). "The relationship between energy consumption, energy prices and economic growth: time series evidence from Asian developing countries". The University of Queensland. Department of Economic. Australia.

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

Barrientos, J., Rodas, E., Velilla, E., Lopera, M., & Villada, F. (2012). Modelo para el pronóstico del precio de la energía eléctrica en Colombia. *Lecturas de Economía*, 77, 91-127.

Belke, A., Dreger, C. and De Haan, F. (2010). "Energy consumption and economic growth: new insights into the cointegration relationship. *Energy Economics*". Elsevier, Vol. 33(5). pp. 782-789.

Bello-Rodríguez, S., & Beltrán-Ahumada R. (2010). Caracterización y pronóstico del precio spot de la energía eléctrica en Colombia. *Revista Maestría en Derecho Económico*, 6(6), 293-316.

Benini M., Marracci M., Pelachi P., & Venturini, A. (2002). Day-ahead Market Price Volatility Analysis in Deregulated Electricity Markets. *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, 3, 1354-1359.

Boletín estadístico de minas y energía SIEL 2012 - 2016, tomado de http://www.upme.gov.co/Boletines/Boletin_Estadistico_2012_2016.pdf

Botero, J., García, J., & Velásquez H. (2016). Efectos del cargo por confiabilidad sobre el precio spot de la energía eléctrica en Colombia. *Cuadernos de Economía*, 68, 491-519. Botero, S., & Cano, J. A. (2008). Análisis de series de tiempo para la predicción de los precios de la energía en la bolsa de Colombia. *Cuadernos de economía*, 48, 174-208.

Cárdenas, N. (2013). Análisis a la gestión del plan de saneamiento hídrico de Pereira desde la perspectiva integral del recurso, haciendo uso de weap como sistema soporte de decisión. Tesis de pregrado. Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira.

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

CARDER. 2008. Plan de Ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del Río Otún. Pereira.

CARVAJAL Y., MARCO B. 2005 Modelos Multivariados de Predicción de Caudal Mensual Utilizando Variables Macro climáticas: Caso de Estudio Río Cauca. Colombia, Ingeniería Y Competitividad ISSN: 0123-3033, 2005 vol:7 fasc.: 1 págs.: 18 - 32.

CARVAJAL, L.F., SALAZAR J.E., MESA, O.J., y POVEDA, G. 1994. Aplicación del Análisis Espectral Singular a series hidrológicas en Colombia. Memorias del XVI Congreso Latino- Americano de Hidráulica e Hidrología, IAHS, Santiago de Chile, Vol.3, 97-108.

Chase R. & Jacobs F. (2014). Administración de operaciones. Producción y Cadenas de suministros. Editorial Mc Graw Hill. Decimotercera edición.

Chopra, S., & Meindl, P. (2008). Administración de la cadena de suministro. Mexico: Prentice Hall.

Compañía Expertos en Mercados (s.f.) Indicadores Energéticos. Disponible en <http://www.xm.com.co/Pages/Home.aspx>.

Contreras J., Espínola, R., Nogales, F., & Conejo, A. (2003). Arima Models to Predict Next-Day Electricity Prices. *IEEE Transactions on Power Systems*, 18(3), 1014-1020.

Creswell, J. W. (2013). *Qualitative Inquiry & Research Design: Choosing among Five Approaches* (3rd ed.). Thousand Oaks, CA: SAGE.

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

Decreto 3930 de 2010, Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial.
http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/decretos/2010/dec_3930_2010.pdf.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (24 de noviembre de 2005).
Proyecciones de población municipales por área. Recuperado en agosto de 2012 de www.dane.gov.co.

Dergiades, T. and Tsoulfidis, L. (2008). "Estimating residential demand for electricity in the United States, 1965-2006". *Energy Economic*, 30. pp. 2722-2730.

Diebold, F. (2001). *Elementos de pronósticos*. México: International Thomson Editores.
DR Anderson, DJ Sweeney, TA Williams, GS García - 1999, *Métodos Cuantitativos para los negocios*.

Duarte, O., & García, J. (2015). Estimación del precio marginal del sistema eléctrico colombiano: una mirada desde la organización industrial. *Ecos de Economía*, 19(41), 1-23.

El Espectador. (2016, febrero 17). Sector eléctrico se enfrenta al momento más difícil de la sequía.

Empresa de Energía de Pereira. 2017. Informe de gestión. Recuperado de http://www.eep.com.co/images/stories/informes/Informe_de_Gestion_2017.pdf.

Empresa de Energía de Pereira. 2018. Informe de gestión. Recuperado de http://www.eep.com.co/images/stories/informes/Informe_de_gestion_2018.pdf.

Eras, A. (2012). "Estudio Energético del Sistema Eléctrico en Ecuador. Impulso a la Energía Solar Fotovoltaica". Máster en Energías Renovables y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

Garcés L. P, Gómez O, "Análisis de confiabilidad del sistema de transmisión regional utilizando simulación de Montecarlo", Proyecto de Grado, Universidad Tecnológica de Pereira, 2003.

García, R., Contreras, J., & Van Akkeren, M. (2005). A garch forecasting model to predict day-ahead electricity prices. *IEEE Transactions on Power Systems*, 20(2), 867-874.

García-Serna, M.I., Morales-Pinzón, T., Guerrero, Erazo, J. (2014). Análisis de flujos de agua en áreas metropolitanas desde la perspectiva del metabolismo urbano. *Revista Luna Azul*, 39, 234-249.

GEORGAKAKOS Y KRZYSZTOFOWICZ, 2001. Probabilistic & Ensemble Forecasting. *Journal of hydrology*. 249.1

GONZÁLEZ, Dora E. y ECHEVERRI, Jorge A. Saneamiento Hídrico en Colombia: Instituciones y situación actual. *Ecología y Economía* N°18. Departamento de Economía, Universidad EAFIT. Medellín. Abril, 2004. pp. 73-97.

González, L., & Meza, M. (2011). Análisis del Comportamiento del Precio Spot de la Energía en Colombia. (Tesis de Grado, Universidad Industrial de Santander, Colombia).

Grajales, D. (2009). Modelación del precio de la energía en Colombia usando un modelo de inferencia neuro difuso (anfis). *Revista Soluciones de Postgrado eia*, 3, 25-38.

Guerrero V. M, "Análisis estadístico de series de tiempo económicas", segunda edición, grupo GEO, 2003.

Gujarati, D. (2004). "Basic Econometrics". 4th Edition, Mc Graw Hill.

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

Gutiérrez, Alfonso. (2003). Alfabetización digital. Algo más que ratones y teclas.

Hadi Sadeghia, M. R. (2017, January). A comprehensive sequential review study through the generation expansion planning. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1369-1394.

Hanke, J., & Wichern, D. (2003). *Pronósticos en los Negocios*. 8.º edición. México: Pearson Prentice Hall.

Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación*. 6 edición. Mc-Graw Hill.

Holguín-Veras, J. y Thorson, E. (2000). An Investigation of the Relationships Between the Trip Length Distributions in Commodity-Based and Trip-Based Freight Demand Modeling. *Transportation Research Record*, pp. 37-48.

Holguín-Veras, J., S. M., Polimeni, J. y Cruz, B. (2008). An Investigation on the Effectiveness of Joint Receiver-Carrier Policies to Increase Truck Traffic in the Off-peak Hours. *Network Spatial Economics*, 8(4), pp. 327-354.

Holguín-Veras, J., Silas, M., Polimeni, J. y Cruz, B. (2007). An Investigation on the Effectiveness of Joint Receiver- Carrier Policies to Increase Truck Traffic in the Off-peak Hours. Part I: The Behavior of Receivers. *Network Spatial Economics*, 7(3), pp. 277-295.

Hurtado, L., Quintero O., & García, J. (2014). Estimación del precio de oferta de la energía eléctrica en Colombia mediante inteligencia artificial. *Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa*, 18, 54-87.

INGEOMINAS. (2003). Notas explicativas, Mapa geológico de Colombia. Disponible en: <https://www2.sgc.gov.co/ProgramasDeInvestigacion/Geociencias/Documents/P>

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

roducto%20Mapa%20Geologico%20Colombia/02_Gomez-et-al-2015_Notas-explicativas_Mapas-Geologicos-de-Colombia.pdf.

Law A. M, Kelton W. D, "Simulation modeling and analysis", Mc-Graw Hill, 2000.

López J, Rengifo E, "Modelamiento de la demanda para estudios de confiabilidad", Proyecto de Grado, Universidad Tecnológica de Pereira, 2006.

Marín Ureña, Juan Miguel (2007) "Estudio de costos de instalación de sistemas pico y micro hidroeléctrico (100 W a 100 kW)", Universidad de Costa Rica.

MEDINA, S.; GARCÍA, J. (2005). Predicción de demanda de energía en Colombia mediante un sistema de inferencia difuso neuronal. Revista Energética, 33, 15-24.

MEJÍA, J., POVEDA, G. 2005. Ambientes atmosféricos de sistemas convectivos de meso escala sobre Colombia durante 1998 según la misión TRMM y el Reanálisis NCEP/NCAR. Revista Ciencias de la Tierra. Número 113-diciembre de 2005.

Mendoza, J. (2010). "Estimación de la Demanda de Energía Eléctrica de la Empresa ELECTRICARIBE S.A. de la Ciudad de Santa Marta, Durante el Periodo Comprendido entre 1998-2006". Tesis de Magíster en Ciencias Económicas, Universidad Nacional de Colombia.

Miller I. R, Freund J. E, Johnson R, "Probability and statistics for engineers", Prentice Hall, 1992.

Modelación Lineal Inversa, Memorias del XVI Congreso Latino Americano de Hidráulica e Hidrología, IAHR, Santiago de Chile, Vol. 4, 119-129, 1994.

- Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.
- Morales, T., Flórez, M.T. y Ramírez, C.L. (2011). Indicadores ambientales para el estudio de la dinámica del recurso hídrico en Risaralda. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Murillo, J., Trejos, A. y Carvajal, P. (2003). "Estudio del pronóstico de la demanda de energía eléctrica utilizando modelos de series de tiempo". *Scientia et Technica*. Año IX, 23, 37-42.
- Organización Meteorológica Mundial (2003). Declaración de la OMM sobre el estado del clima mundial.
- OuYang, F., Zhao, H.D., et al. (2008) The Simulation Analysis of the Online Publishing Business Model Based on E3-Value. *China Soft Science*, 3, 134-139.
- POVEDA, G. 2004. La Hidro climatología colombiana: Una síntesis desde la escala interdecadal hasta la escala diurna. *Revista Ciencias de la Tierra*. Número 107-junio.
- POVEDA, G. El chorro del chocó y su influencia sobre la Hidro climatología de la costa pacífica y El occidente de Colombia Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
- POVEDA, G., Jaramillo, A. 2000. ENSO-related variability of river discharges and soil moisture in Colombia, *Biospheric Aspects of the Hydrologic Cycle*. IGBP. 8. 3-6.
- POVEDA, G., y Mesa, O.J. 1993. "Metodologías de predicción de la hidrología Colombiana considerando el evento El Niño-Oscilación del Sur (ENOS)". *Revista Atmósfera*, 17, Sociedad Colombiana de Meteorología, Bogotá.

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

PULGARÍN. 2002. "Predicción de caudales medios mensuales en ríos colombianos usando métodos no lineales". *Meteorología Colombiana*, 6, 101-110.

Quintana, A.P. (2009). Rasgos del conflicto por la gestión colectiva del agua en Dosquebradas - Risaralda, Colombia. Recuperado de http://www.cap-net-esp.org/document/document/146/124_Rasgos_del_conflicto_gestion_del_agua_Colombia.doc.

Revista Semana. (2015, agosto 23). Alta tensión en el sector eléctrico.

Rueda, V. (2011). "Predicción del Consumo de Energía en Colombia con Modelos no Lineales". Tesis de Maestría en Ingeniería Administrativa, Universidad Nacional de Colombia.

Sanz J, *Energía hidroeléctrica*, 2008.

Sierra, J., & Castaño, E. (2010). Pronóstico de precios spot del mercado eléctrico colombiano con modelos de parámetros variantes en el tiempo y variables fundamentales. vii Coloquio Regional de Estadística: Estadística Aplicada: "Didáctica de la Estadística y Métodos Estadísticos en Problemas Socioeconómicos" Universidad Nacional de Colombia.

Suarez-Balcazar, Y., Balcazar, F. E., & Taylor-Ritzler, T. (2009). Using the Internet to conduct research with culturally diverse populations: Challenges and opportunities. *Cultural Diversity and Ethnic Minority Psychology*, 15(1), 96-104.

Taylor T, Ritzler, Yolanda, Suarez-Balcazar, Edurne Garcia-Iriarte, David B. Henry, Fabricio E. Balcazar (2013). Understanding and Measuring Evaluation Capacity: A Model and Instrument Validation Study.

Modelo de pronóstico de caudal del río Otún y su impacto en la generación de energía hidráulica.

Torres A, "Probabilidad, variables aleatorias, confiabilidad y procesos estocásticos en ingeniería eléctrica", Universidad de los Andes, 1996.

Uche J, La energía en el agua, 2013.

UNESCO (2017). Global Geoparks: a strategy towards global understanding and sustainability. Episodes, 40(4), 349-355.

Vahos M. A, Romero C. A, "Modelamiento del caudal de un río para estudios de confiabilidad", Proyecto de Grado, Universidad Tecnológica de Pereira, 2006.

Wilson, J. Keating, B. Pronósticos en los negocios con Forecast X basado en Excel. Editorial Mc Graw Hill. Quinta Edición.

Zapata C. J, "Análisis probabilístico y simulación", Universidad Tecnológica de Pereira, 2005.

Zapata C. J, "Confiabilidad de sistemas eléctricos", Universidad Tecnológica de Pereira, 2005.

Zapata C. J, Campos E. L, "Valoración de confiabilidad de sistemas de generación con recursos limitados de energía utilizando simulación de Montecarlo", Revista Scientia et Technica, No. 29, 2005.

Zapata C. J, Garcés L. P, Gómez O, "Reliability assessment of energy limited systems using sequential Montecarlo simulation", IEEE Transmission and Distribution Latin America Conference, 2006.

Zapata C. J, Rengifo E, López J, "Efecto del modelamiento de la demanda en estudios de confiabilidad de largo plazo", Revista Scientia y Technica, No. 31, 2006.