

**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

TEMA:

**Centrales hidroeléctricas reversibles en embalses existentes,
para optimizar recursos hídricos en las presas de Azuay.**

AUTOR:

Montiel Vera, Jorge Alejandro

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO CIVIL**

TUTOR:

Martínez Rehpani, Colón Gilberto

Guayaquil, Ecuador

20 de septiembre de 2022



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo de titulación fue realizado en su totalidad por **Montiel Vera, Jorge Alejandro**, como requerimiento para la obtención del título de **Ingeniero Civil**.

TUTOR

f. _____

Martínez Rehpani, Colón Gilberto

DIRECTOR DE LA CARRERA

f. _____

Alcívar Bastidas, Stefany Esther

Guayaquil, a los 20 del mes de septiembre del año 2022



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Montiel Vera, Jorge Alejandro**

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación, **Centrales hidroeléctricas reversibles en embalses existentes, para optimizar recursos hídricos en las presas de Azuay** previo a la obtención del título de **Ingeniero Civil**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 20 del mes de septiembre del año 2022

EL AUTOR

f. _____

Montiel Vera, Jorge Alejandro



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

AUTORIZACIÓN

Yo, **Montiel Vera, Jorge Alejandro**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación, **Centrales hidroeléctricas reversibles en embalses existentes, para optimizar recursos hídricos en las presas de Azuay**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 20 del mes de septiembre del año 2022

EL AUTOR:

f. _____

Montiel Vera, Jorge Alejandro

Reporte urkund



Document Information

Analyzed document	Montiel Vera, Jorge..docx (D144245614)
Submitted	9/17/2022 12:43:00 AM
Submitted by	
Submitter email	clara.glas@cu.ucsg.edu.ec
Similarity	4%
Analysis address	clara.glas.ucsg@analysis.orkund.com

Sources included in the report

SA	T-ESPE-047397.pdf Document T-ESPE-047397.pdf (D9410393)	 2
SA	E_05_VELASTEGUI_DANIEL.pdf Document E_05_VELASTEGUI_DANIEL.pdf (D113067268)	 2
SA	TESIS SECTOR ELECTRICO.pdf Document TESIS SECTOR ELECTRICO.pdf (D36152220)	 31

Entire Document

f. 

Martínez Rehpani, Colón Gilberto

AGRADECIMIENTO

Agradezco primero a Dios, por la ayuda en momentos difíciles y por ser un guía a lo largo de mi vida.

Agradezco a mi familia: mis padres, mi tía, mi hermano y mi abuela, por siempre estar a mi lado y ayudado en todo lo que ha estado a su alcance, además de ser una fuente de inspiración para mí.

Agradezco a mi tutor, Ing. Gilberto Martínez, por haberme guiado a lo largo de este trabajo y ayudado en las inquietudes que he tenido, además por sus clases en mis primeros semestres de la carrera, lo cual hizo que me gustara aún más la carrera de Ingeniería.

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado a mi mamá, por haberme dado la oportunidad de culminar mi carrera universitaria en esta universidad; a mi tía, por sus consejos y su ayuda incondicional; a mi abuela, por inspirarme a siempre seguir adelante; y, finalmente, a mi padre, por ayudarme en todo lo que estuvo a su alcance.



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. _____

Ing. Federico Von Buchwald, PhD.

DECANO

f. _____

Ing. Clara Glas Cevallos, M. Sc.

DOCENTE DE LA CARRERA

f. _____

Ing. Javier Plaza, PhD.

OPONENTE

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	2
Antecedentes.....	2
Objetivo general.....	2
Objetivos específicos	3
CAPÍTULO 1: DESERTIFICACIÓN Y ESTIAJE	4
1.1 Desertificación en Ecuador	4
1.1.1 Sequías	6
1.1.2 Erosión de suelos	11
1.1.3 Deforestación	13
1.1.4 Cambio climático	17
1.2 Desertificación en la provincia de Azuay	17
1.2.1 Generalidades de la provincia de Azuay	17
1.2.2 Proceso de desertificación en la provincia del Azuay.....	31
CAPÍTULO 2: PERFIL ENERGÉTICO DE ECUADOR.....	51
2.1 Fuentes de energía en Ecuador.....	51
2.1.1 Energía hidráulica.....	52
2.1.2 Energía eólica.....	53
2.1.3 Energía solar	55
2.1.4 Energía en centrales termoeléctricas.....	57
2.1.5 Energía mediante interconexiones.....	60
2.2 Producción de centrales hidroeléctricas.....	61
2.2.1 Producción de centrales hidroeléctricas en Azuay	63
2.3 Producción de centrales termoeléctricas.....	75
2.4 Transacciones internacionales de energía.....	79
CAPÍTULO 3: CENTRALES HIDROELÉCTRICAS REVERSIBLES.....	83
3.1 Historia	84

3.2 Funcionamiento	84
3.3 Bomba-turbina	85
3.3 Tipos de centrales hidroeléctricas reversibles	87
3.3.1 Centrales hidroeléctricas reversibles tradicional	87
3.3.2 Centrales hidroeléctricas reversibles con agua subterránea	88
3.3.3 Centrales hidroeléctricas reversibles con agua de mar	89
3.3.4 Centrales de almacenamiento por bombeo puro	91
3.3.5 Centrales de bombeo y almacenamiento natural	92
3.4 Funciones complementarias	92
3.4.1 Nivelación de carga	92
3.4.2 Regulación de la frecuencia.....	93
3.4.3 Capacidad de arranque en cero.....	94
3.5 Implementación de otras fuentes energéticas	95
3.6 Centrales hidroeléctricas reversibles en el mundo	96
3.6.1 Características.....	98
3.6.2 Ejemplos.....	102
CAPÍTULO 4: PROPUESTA DE CENTRAL HIDROELÉCTRICA REVERSIBLE PARA EL PROYECTO HIDROPAUTE.....	109
4.1 Factores a considerar	109
4.1.1 Factores generales asociados al sistema eléctrico	109
4.1.2 Factores relacionados con el emplazamiento de la central	110
4.1.3 Factores económicos asociados al sistema eléctrico	112
4.2 Propuesta	114
4.2 Beneficios	123
CONCLUSIONES	125
RECOMENDACIONES	127
REFERENCIAS	128

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Mapa de desertificación de Ecuador a nivel cantonal. Fuente: Ministerio del Ambiente, 2015	5
Ilustración 2. Mapa de Ecuador con índice ombrotérmico. Fuente: Ministerio del ambiente, 2015	7
Ilustración 3. Secuencia de los tipos de sequías e impactos. Fuente: NDMC, 1995. Obtenido: Valiente, 2001	9
Ilustración 4. Sequía en río Tomebamba en Cuenca. Fuente: El Mercurio.....	10
Ilustración 5. Mapa de zonas susceptibles a erosión en Ecuador. Fuente: Ministerio del ambiente, 2015	12
Ilustración 6. Erosión de Río Coca. Fuente: Primicias Ec.....	13
Ilustración 7. Mapa de amenaza de incendios forestales de Ecuador. Fuente: Ministerio del Ambiente y Agua, 2021	16
Ilustración 8. Provincia del Azuay. Adaptado de: Wikipedia	18
Ilustración 9. Tipos de clima en la provincia del Azuay. Fuente: MAGAP 2002. Obtenido: Plan de desarrollo y ordenamiento del Azuay 2015-2030	20
Ilustración 10. Temperatura promedio anual del Azuay. Fuente: INFOPLAN 2006. Obtenido: Plan de desarrollo y ordenamiento territorial del Azuay	21
Ilustración 11. Mapa de isotermas de la provincia del Azuay. Fuente: INFOPLAN 2006. Obtenido: Plan de desarrollo y ordenamiento territorial del Azuay 2015-2030	22
Ilustración 12. Curva de precipitación mensual promedio del Azuay. Fuente: IRHA 2006. Obtenido: Plan de desarrollo y ordenamiento territorial del Azuay	23
Ilustración 13. Mapa de isoyetas de Azuay. Fuente: ODEPLAN 2003. Obtenido: Atlas de la provincia del Azuay	24
Ilustración 14. Curva de evotranspiración promedio del Azuay. Fuente: IRHA 2006. Obtenido: Plan de desarrollo y ordenamiento territorial del Azuay	25
Ilustración 15. Mapa de Azuay según los meses secos. Fuente: ODEPLAN 2003. Obtenido: Atlas de la provincia del Azuay	26
Ilustración 16. Sistemas hídricos de la provincia del Azuay. Fuente: INFOPLAN 2006. Obtenido: Plan de desarrollo y ordenamiento territorial del Azuay	28

Ilustración 17. Cuencas y Subcuencas de la provincia del Azuay. Fuente: INFOPLAN 2006. Obtenido: Plan de desarrollo y ordenamiento territorial del Azuay.....	28
Ilustración 18. Mapa de uso y cobertura del suelo de la provincia del Azuay. Fuente: MAE, MAGAP, SENPLADES 2015. Obtenido: Plan de desarrollo y ordenamiento territorial del Azuay.....	31
Ilustración 19. Mapa de sensibilidad ante la desertificación de la provincia del Azuay en el año 2000. Fuente: Portilla at al., 2014	32
Ilustración 20. Mapa de sensibilidad ante la desertificación de la provincia del Azuay en el año 2008. Fuente: Portilla at al., 2014	33
Ilustración 21. Cuadro del porcentaje de superficies sensibles a la desertificación en distintos años. Fuente: Portilla at al., 2014	34
Ilustración 22. Regímenes de precipitaciones en la cuenca del río Paute. Fuente: Celleri et al., 2007	36
Ilustración 23. Ejemplos de regímenes en Cuenca del río Paute. Fuente: INAMHI, 2013. Obtenido: Valarezo, 2017	37
Ilustración 24. Ubicación de estaciones pluviométrica. Fuente: Instituto Geográfico Militar, 2004. Obtenido: Valarezo, 2017	38
Ilustración 25. Gráfico de IPE histórico en algunas estaciones en la cuenca del río Paute. Fuente: Valarezo, 2017.....	40
Ilustración 26. Características de escenarios futuros presentes en el informe de la IPPC. Fuente: Van Vuuren et al., 2011. Obtenido: Araneda, 2017	41
Ilustración 27. Media de índice SPI en lapsos de 10 años. Fuente: Araneda, 2017.....	42
Ilustración 28. Media de índice genérico en lapsos de 10 años. Fuente: Araneda, 2017	42
Ilustración 29. Mapa de zonas en procesos de erosión con riesgo a incendios. Fuente: Corral & Reyes, 2020.....	44
Ilustración 30. Mapa de zonas con procesos de erosión. Fuente: Corral & Reyes, 2020.....	45
Ilustración 31. Mapa de calor por concentración de incendios forestales en la provincia del Azuay. Fuente: Garzón & Campoverde, 2020	47
Ilustración 32. Variación de la temperatura anual media para los 4 escenarios del IPPC. Fuente: Pozo, 2018.....	48

Ilustración 33. Valores de caudal medio mensual de estación W1660 (Presa Daniel Palacios) en los distintos escenarios IPPC. Fuente: Pozo, 2018.....	49
Ilustración 34. Valores de caudal medio mensual de estación W1560 (Presa Cardenillo) en los distintos escenarios IPPC. Fuente: Pozo, 2018.....	50
Ilustración 35. Central hidroeléctrica Manduriacu. Quito-Cotacachi, Ecuador. Fuente: CELEC.....	53
Ilustración 36. Parque Eólico Villonaco. Loja, Ecuador. Fuente: Ministerio de Turismo.....	55
Ilustración 37. Parque solar fotovoltaico Loja Energy. Loja, Ecuador. Fuente: Solartia.....	57
Ilustración 38. Central Térmica Esmeralda II. Esmeralda, Ecuador. Fuente: CELEC.....	59
Ilustración 39. Producción mensual de energía hidráulica nacional 2020. Fuente: Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables, 2021	62
Ilustración 40. Caudales medios en embalses conectados al SNI en el año 2020. Fuente: Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables, 2021	62
Ilustración 41. Esquema del Complejo Hidroeléctrico Paute Integral. Fuente: CELEC.....	63
Ilustración 42. Esquemas del Complejo Hidroeléctrico Paute Integral. Fuente: Primicias, 2022	64
Ilustración 43. Central Hidroeléctrica Paute-Mazar. Fuente: Quintero, 2016 ...	65
Ilustración 44. Caudal mensual de embalse Mazar 2017. Fuente: CELEC Hidropaute, 2017	66
Ilustración 45. Distribución de volúmenes de agua en la central Paute-Mazar. Fuente: CELEC Hidropaute, 2017.....	67
Ilustración 46. Generación de energía neta de la central Paute-Mazar. Fuente: CELEC Hidropaute, 2017.....	68
Ilustración 47. Generación energética histórica de la Central Paute-Mazar. Fuente: CELEC Hidropaute, 2017	69
Ilustración 48. Central Hidroeléctrica Paute-Molino: Presa Daniel Palacios. Fuente: Primicias	70

Ilustración 49. Caudal mensual de embalse Amaluza 2017. Fuente: CELEC Hidropaute, 2017	70
Ilustración 50. Distribución de volúmenes de agua en la central Paute-Molino. Fuente: CELEC Hidropaute, 2017	71
Ilustración 51. Generación de energía neta de la central Paute-Molino. Fuente: CELEC Hidropaute, 2017	72
Ilustración 52. Generación energética histórica de la Central Paute-Molino. Fuente: CELEC Hidropaute, 2017	73
Ilustración 53. Esquema de Central Sopladora. Fuente: CELEC	74
Ilustración 54. Caudal mensual de central Sopladora 2017. Fuente: CELEC Hidropaute, 2017	74
Ilustración 55. Generación neta mensual de central Sopladora 2017. Fuente: CELEC Hidropaute, 2017	75
Ilustración 56. Producción mensual de energía térmica de empresas generadoras. Fuente: Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables, 2021	76
Ilustración 57. Emisiones de CO2 producto de generación eléctrica en el año 2020. Fuente: CENACE, 2020	79
Ilustración 58 Valores de las importaciones energéticas mensuales de Colombia del año 2020. Fuente: Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables, 2021	81
Ilustración 59. Energía importada mensual de Colombia del año 2020. Fuente: Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables, 2021	81
Ilustración 60. Esquema de Central Hidroeléctrica Reversible. Fuente: Navalón, B.	83
Ilustración 61. Partes de una central hidroeléctrica reversible. Adaptado de: Iberdrola	85
Ilustración 62. Rango de aplicación de diferentes tipos de bombas-turbina. Fuente: Chapallaz, Eichenberger, & Fischer, 1992	87
Ilustración 63. Central Hidroeléctrica reversible Cortes- La Muela en Valencia, España. Adaptado de: ABC	88
Ilustración 64. Esquemas de Hidroeléctrica reversible con agua subterránea. Fuente: Allen et al, 1984	89

Ilustración 65. Central Hidroeléctrica Reversible en Okinawa Yanbaru, Japón. Adaptado de: The Conversation.....	90
Ilustración 66. Esquema de funcionamiento de Central Hidroeléctrica Reversible Soria-Chira, España. Fuente: López, 2022.....	91
Ilustración 67. Esquema de central de almacenamiento por bombeo puro. Fuente: Wickramarathna, 2011	92
Ilustración 68. Esquema de central de bombeo y almacenamiento natural. Fuente: Wickramarathna, 2011	92
Ilustración 69. Proceso de nivelación de carga en un sistema eléctrico. Fuente: Jiménez, 2012.....	93
Ilustración 70. Fructuaciones en un control de frecuencia. Fuente: Huber & Gutschi, 2010. Obtenido: Jiménez, 2012.....	94
Ilustración 71. Central eléctrica híbrida. Fuente: Lee et al., 2020	96
Ilustración 72. Capacidad instalada de centrales hidroeléctricas reversibles en el mundo. Fuente: Jiménez, 2012	99
Ilustración 73. Salto hidráulico de centrales hidroeléctricas reversibles en el mundo. Fuente: Jiménez, 2012.....	100
Ilustración 74. Volumen de almacenamiento de centrales hidroeléctricas reversibles en el mundo. Fuente: Jiménez, 2012	101
Ilustración 75. Relación volumen/potencia de centrales hidroeléctricas reversibles en el mundo. Fuente: Jiménez, 2012	102
Ilustración 76. Central hidroeléctrica reversible Bath County. Adaptado de: Google imágenes	103
Ilustración 77. Embalse superior de central hidroeléctrica reversible Bath County. Fuente: Herald Courier, 2020.....	103
Ilustración 78. Embalse inferior de central hidroeléctrica reversible Bath County. Fuente: Herald Courier, 2020.....	104
Ilustración 79. Esquemas de central hidroeléctrica reversible de Grand Maison. Fuente: Électricité de France (EDF), 2011	105
Ilustración 80. Embalse superior de central hidroeléctrica reversible Grand Maison. Fuente: NS Energy	106
Ilustración 81. Embalse inferior de central hidroeléctrica reversible Grand Maison. Fuente: NS Energy	106

Ilustración 82. Embalse superior de la central hidroeléctrica reversible de Tianhuangping. Fuente: Sky_Blue	107
Ilustración 83. Embalse inferior de la central hidroeléctrica reversible de Tianhuangping. Fuente: Power-technology, 2002	108
Ilustración 84. Curva de almacenamiento requerido según la carga hidráulica para distintas potencias de centrales. Fuente: Jiménez, 2012	110
Ilustración 85. Esquema de central hidroeléctrica reversible Piastra Edolo, Italia. Adaptado de: Google Imágenes.....	111
Ilustración 86. Precio medio mensual de energía facturada en Ecuador en el año 2020. Fuente: Agencia de regulación y control de energía y recursos naturales no renovables, 2021	113
Ilustración 87. Propuesta 1 de central hidroeléctrica reversible. Fuente: Autor. Adaptado de: Google Earth.....	114
Ilustración 88. Esquema de propuesta 1 de central hidroeléctrica reversible. Fuente: Autor	115
Ilustración 89. Esquema de propuesta 1 de central hidroeléctrica reversible con conducción superficial. Fuente: Autor	116
Ilustración 90. Esquema de anclaje de las tuberías sobre roca. Fuente: Autor	116
Ilustración 91. Variante de la propuesta 1 de central hidroeléctrica reversible. Fuente: Autor. Adaptado de: Google Earth	117
Ilustración 92. Esquema de la variante de la propuesta 1 de central hidroeléctrica reversible. Fuente: Autor.....	118
Ilustración 93. Esquema de variante de la propuesta 1 de la central hidroeléctrica reversible con conducción superficial. Fuente: Autor.....	118
Ilustración 94. Propuesta 2 de central hidroeléctrica reversible. Fuente: Autor. Adaptado de: Google Earth.....	119
Ilustración 95. Esquema de propuesta 2 de central hidroeléctrica reversible. Fuente: Autor	120
Ilustración 96. Esquema de propuesta 2 de la central hidroeléctrica reversible con conducción superficial. Fuente: Autor.....	121
Ilustración 97. Esquema del funcionamiento de una bomba turbina reversibles. Fuente: Autor	121

Ilustración 98. Esquema del funcionamiento de bombas turbina reversibles en serie. Fuente: Autor.....122

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Números de incendios forestales, periodo 2012-2019. Fuente: Ministerio del Ambiente y Agua, 2021	15
Tabla 2. Tipos de climas de Azuay. Fuente: MAGAP 2002. Obtenido: Plan de desarrollo y ordenamiento del Azuay 2015-2030	19
Tabla 3. Rango de temperatura y áreas en Azuay. Fuente: INFOPLAN 2005. Obtenido: Plan de desarrollo y ordenamiento del Azuay 2015-2030	21
Tabla 4. Rango de precipitaciones en Azuay. Fuente: ODEPLAN 2003. Obtenido: Atlas de la provincia del Azuay	23
Tabla 5. Sistemas hídricos, Cuencas y Subcuencas de la provincia del Azuay. Fuente: INFOPLAN 2006. Obtenido: Plan de desarrollo y ordenamiento territorial del Azuay	27
Tabla 6. Porcentaje de Uso y Cobertura del suelo en la provincia del Azuay. Fuente: MAE, MAGAP, SENPLADES 2015. Obtenido: Plan de desarrollo y ordenamiento territorial del Azuay	30
Tabla 7. Categorización de IPE. Fuente: Valarezo, 2017	35
Tabla 8. Estaciones de estudio. Fuente: Valarezo, 2017	37
Tabla 9. Periodo de retornos de sequías en la cuenca del río Paute. Fuente: Valarezo, 2017	40
Tabla 10. Deforestación Brutal anual promedio en Azuay. Fuente: Ministerio del ambiente, 2017	46
Tabla 11. Regeneración anual promedio en Azuay. Fuente: Ministerio del ambiente, 2017	46
Tabla 12. Deforestación Neta anual promedio en Azuay. Fuente: Ministerio del ambiente, 2017	46
Tabla 13. Tabla de consumo de combustibles para la producción energética del 2020. Fuente: Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables, 2021	77
Tabla 14. Monto empleado en combustibles para generación energética.	77
Tabla 15. Energía importada de Colombia y sus valores mensuales en el año 2020. Fuente: Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables, 2021	80

Tabla 16. Capacidad energética instalada (MW) de países poseedores de centrales hidroeléctricas reversibles al año 2009. Fuente: EIA Obtenido: Jiménez, 2012..... 98

RESUMEN

Actualmente, Ecuador enfrenta problemas de sequías estacionales, siendo este uno de los indicadores de procesos de desertificación de algunas zonas del país. Uno de los principales sectores afectados por este fenómeno es el de la generación energética del país. Durante la producción de la temporada seca o de estiaje, la producción energética baja considerablemente debido a la gran importancia de la energía hidráulica para el sector energético del país. El país ha sobrellevado esta problemática mediante el funcionamiento de las centrales termoeléctricas y las compras de energía a países vecinos, de manera que la baja producción de las centrales hidroeléctricas pase desapercibido. Estas soluciones traen consigo consecuencias negativas a nivel ambiental y económico. Por todo lo anterior, en esta investigación se destacan las centrales hidroeléctricas reversibles como sustituto de las centrales termoeléctricas, suponiendo un ahorro en cuanto al gasto que supone las compras energéticas a países vecinos para satisfacer el déficit energético en las temporadas de estiajes, además de la contribución ambiental que supone su uso.

Palabras clave: Estiaje, sequías, desertificación, centrales hidroeléctricas reversibles, centrales termoeléctricas, transacciones energéticas.

ABSTRACT

At present, Ecuador faces seasonal drought problems, which is one of the indicators of desertification processes in some areas of the country. One of the main sectors affected by this phenomenon is the country's energy generation. During the dry season or low water production, energy production drops considerably due to the great importance of hydraulic energy for the country's energy sector. The country has coped with this problem by operating thermoelectric power plants and purchasing energy from neighboring countries, so that the low production of hydroelectric power plants goes unnoticed. These solutions have negative environmental and economic consequences. For all of the above, this research highlights reversible hydroelectric power plants as a substitute for thermoelectric power plants, which represent a saving in terms of the cost of energy purchases from neighboring countries to meet the energy deficit in low water seasons, in addition to the environmental contribution of their use.

Key words: Low water, droughts, desertification, reversible hydroelectric power plants, thermoelectric power plants, energy transactions.

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

En Ecuador, las centrales hidroeléctricas representan la fuente principal de energía, las cuales dependen netamente del agua. Sin embargo, al igual que muchos países, Ecuador enfrenta distintos problemas durante las temporadas de estiaje o sequía, lo que dificulta la generación de energía en el país. En ese sentido, con el propósito de suplir la demanda de energía, el país recurre al uso de las centrales termoeléctricas y a las interconexiones eléctricas, esto es, la compra de energía a países vecinos como, por ejemplo, Colombia y Perú (Centro Nacional de Control de Energía [CENACE], 2020).

Como se expuso, el país adopta estos métodos porque depende de las centrales hidroeléctricas y, debido a las épocas de estiaje, las centrales hidroeléctricas no funcionan de manera esperada. Unos de los ríos más afectados por esta temporada es el río Paute, en el que se encuentra una de las centrales hidroeléctricas más importantes a nivel nacional. En las peores temporadas de estiaje, esta hidroeléctrica se ha visto obligada a racionar la energía, puesto que en el río Paute no fluye el caudal necesario para satisfacer la demanda nacional.

En años posteriores, con la construcción de más hidroeléctricas se propuso solucionar el problema del estiaje, así como remediar los problemas del río Paute a través de la fabricación de embalses. Sin embargo, las temporadas de estiaje agravan aún más la situación, debido a los cambios climáticos y los procesos de desertificación de zonas cercanas. Además, los problemas operativos de las centrales hidroeléctricas actuales obligan al país a seguir empleando las centrales termoeléctricas y seguir comprando energía a países vecinos.

Objetivo general

Estudiar el uso de centrales hidroeléctricas reversibles o por bombeo para las zonas de la provincia del Azuay, Ecuador, susceptibles a sufrir desertificación por cambio climático, como alternativa para el almacenamiento de energía en la temporada de lluvias y la producción de electricidad durante la temporada de estiaje, con el enfoque en visar la reducción de la dependencia de centrales termoeléctricas o de importación de electricidad de los países vecinos.

Objetivos específicos

- Realizar un levantamiento bibliográfico global sobre sistemas con centrales hidroeléctricas reversibles o por bombeo, y estudiar los factores técnicos y económicos que viabilizarían la implementación de estas centrales de acumulación de energía, en las hidroeléctricas de la provincia del Azuay, Ecuador, implantadas en zonas propensas a desertificación por cambio climático.
- Realizar un levantamiento bibliográfico de la realidad energética ecuatoriana actual con cifras oficiales y con énfasis en la capacidad máxima de generar energía hidroeléctrica por la red hidrográfica del país, la capacidad instalada actualmente por las centrales hidroeléctricas, la generación ecuatoriana a partir de energías renovables, la generación ecuatoriana por combustibles fósiles y la generación por la quema del bagazo de la caña de azúcar. Todo ello, con el propósito de desarrollar un comparativo que incluya la importación y exportación de energía eléctrica a los países vecinos para el último periodo.
- Estudiar la aplicación de los factores técnicos y económicos de viabilidad de una central hidroeléctrica reversible o por bombeo, con la ayuda de un ejemplo esquemático para una hidroeléctrica de la provincia del Azuay, donde la venta de energía por turbinado en la temporada de estiaje supere el costo de almacenar energía por bombeo durante la temporada lluviosa, de acuerdo con los horarios más favorables y el mercado eléctrico actual.

CAPÍTULO 1: DESERTIFICACIÓN Y ESTIAJE

1.1 Desertificación en Ecuador

“La desertificación consiste en la degradación de tierras en las zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas, producto de interacciones diferentes y complejos factores derivados de las actividades humanas y variaciones climáticas de la naturaleza”. Esta es la definición que se emitió durante la Convención de la Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación de 1992, y que muchos países han adoptado (Morales y Parada, 2005),

La desertificación es uno de los problemas ambientales más importantes que afronta la humanidad en tiempo actuales. Este problema tiene un alcance mundial y amenaza a más de 250 millones de personas y alrededor de 4 mil millones de hectáreas, lo cual equivaldría aproximadamente a una tercera parte de la superficie terrestre (Ruiz y Febles, 2004). Debido a su magnitud, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) lo catalogó como “uno de los grandes problemas ambientales”, refiriéndose también a América Latina y a los riesgos que corre debido a la desertificación (Pacheco, 2015). Según Lugo (1995, como se citó en Pacheco, 2015), Ecuador lleva décadas con problemas derivados de la desertificación, esto producto de los ciclos de sequías, deforestación, sobrepastoreo, excesivo uso de químicos, excesiva labranza, entre otros.

La mayor peculiaridad que tiene la desertificación en Ecuador es la estrecha relación con las sequías de régimen oriental y occidental. La desertificación se muestra significativamente en ciertas temporadas del año en casi toda la región Costa, lo que equivale a la región occidental. Cuando ocurre este fenómeno, la otra parte, es decir, la región Sierra o la región oriental, goza de abundante agua debido a las grandes precipitaciones que azota a la región. Los mismo ocurre tiempo después, pero en distintos puestos; es decir, mientras que la región Sierra muestra signos de desertificación, la región Costa u occidental recibe grandes precipitaciones. Esto ocasiona un ciclo de desertificación dañino para el país.

El 4 % del territorio nacional está sujeto a procesos de desertificación avanzado, lo que se traduce en 1 100.00 de hectáreas aproximadamente. La mayor concentración de estos territorios se encuentra en la región Costa,

desertificación son: recurrencia y duración de las sequías, erosión del suelo, deforestación, sobreexplotación de suelos, entre otros.

1.1.1 Sequías

La sequía es una de las fases más relevantes y comunes que ocurre en tierras con proceso existentes o por existir procesos de desertificación. Las sequías se definen como la ausencia de agua por tiempos prolongados, debido a la falta de precipitaciones. Sus causas son variadas. En el caso de Ecuador, según Cadier, Gómez, Calvez y Rossel (1997), “Estas son causadas por situaciones climáticas anómalas: la situación septentrional anómala de la corriente fría de Humboldt y la situación anticiclónica que bloquea la acción de los frentes, sistemas convectivos y depresiones”.

A lo anterior se suma la deforestación, una problemática que afecta el ciclo hidrológico del agua y que, por consiguiente, guarda estrecha relación con las sequías. Tal cual lo mencionó Araneda (2017, como se citó en Núñez Cobo y Verbist, 2018), los eventos de sequías no solo se dan por condiciones climáticas de una región, sino también por la mala gestión de los recursos hídricos de la zona, el cual es un factor que suele pasar desapercibido.

Ecuador se encuentra ubicado en una región geodinámica activa. Debido a esas condiciones geomorfológicas, el país está expuesto a fenómenos hidrometeorológicos, esto es, sequías, inundaciones, deslizamientos y eventos geofísicos como los sismos y erupciones volcánicas (Núñez Cobo y Verbist, 2018). A nivel histórico, el país ha reportado algunos de estos fenómenos, los cuales han afectado a todos sus habitantes.

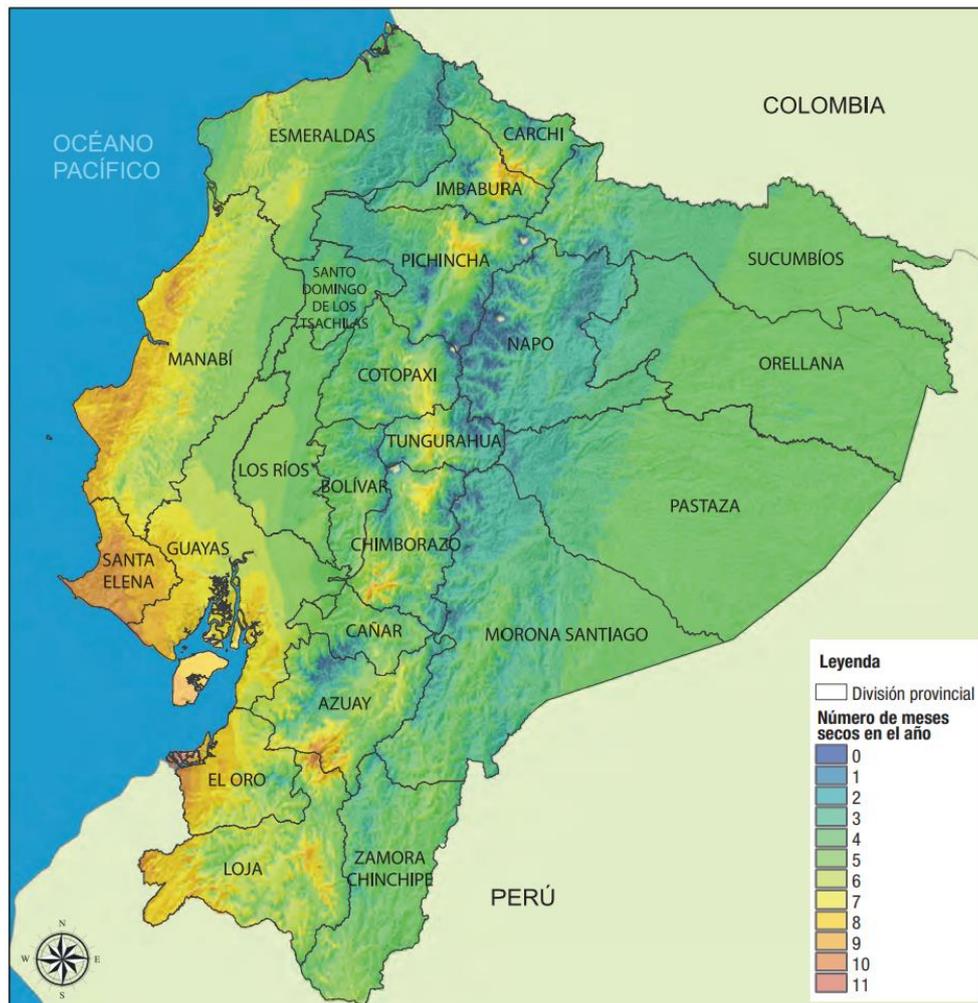


Ilustración 2. Mapa de Ecuador con índice ombrotérmico. Fuente: Ministerio del Ambiente, 2015

Las sequías que afectan a ciertas regiones del país están influenciadas por algunos sistemas meteorológicos. Las sequías principales son las del régimen del Pacífico u Occidental y las del régimen Oriental (Cadier, Gómez, Calvez y Rossel, 1997). El régimen del Pacífico afecta a la mayoría de las provincias de la costa ecuatoriana, cuya estación seca más rigurosa ocurre entre los meses de julio y octubre. En contraste, el régimen Oriental afecta a provincias de la Sierra y oriente del país, que presenta un periodo menos lluvioso entre los meses de noviembre y febrero.

Tipos de sequías

Entre las principales clasificaciones de sequías se encuentra la de Wilhite y Glantz (1985, como se citó en Valiente, 2001), quienes definieron cuatro tipos según la disciplina científica, a saber: sequía meteorológica, sequía hidrológica,

sequía agrícola y sequía socioeconómica. Los tres primeros tipos se enfocan en medir las sequías como un fenómeno físico; mientras que el último lo hace en términos de oferta y demanda (Araneda, 2017).

- Sequía meteorológica: este tipo de sequía ocurre cuando existe ausencia de precipitación por largos periodos de tiempo, inferior a la media. Este tipo es muy propio de la región, debido a que cada región tiene sus propias condiciones. Cabe señalar que es el tipo de sequía más común y el que influye en las demás (Valiente, 2001).
- Sequía hidrológica: este tipo de sequía ocurre cuando existen bajos caudales de agua, lo cuales pueden ser de cuerpos de agua superficiales o subterráneos. Este tipo de sequía suele manifestarse meses después de las sequías meteorológicas (Araneda, 2017).
- Sequía agrícola: este tipo de sequía cuenta con algunas de las características anteriores, tales como escases de precipitaciones, evapotranspiración, déficit hídricos del suelo, bajos niveles de agua subterránea o de embalses, enfocándose en el impacto al sector agrícola. Este tipo de escasez está relacionado con las sequías meteorológicas, puesto que estas impiden contar con suficiente agua para el correcto desarrollo del cultivo, el cual da lugar a la sequía agrícola (Araneda, 2017).
- Sequía socioeconómica: este tipo de sequía se produce cuando el agua disminuye, a tal punto que produce daños económicos a la población de la zona afectada por la sequía (Valiente, 2001).

A continuación, en la Ilustración 3 se exponen los tipos de sequías, así como su relación y afectación.

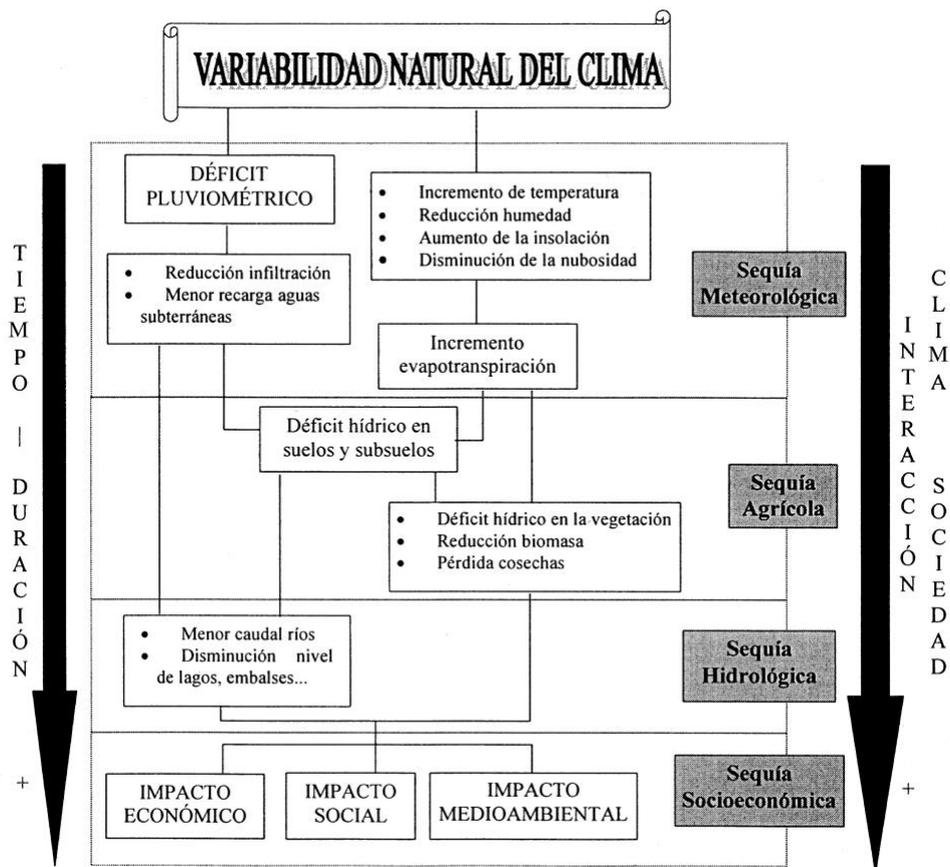


Ilustración 3. Secuencia de los tipos de sequías e impactos. Fuente: NDMC, 1995. Obtenido: Valiente, 2001

Impacto de sequías

Las sequías traen consigo consecuencias importantes para el país, por ejemplo, la interrupción de suministro eléctrico, las pérdidas de sembríos, la escasez de agua, entre otras. Al respecto, la Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA) (2016, como se citó en Núñez Cobo y Verbist, 2018) expresó que la sequía es un desastre natural muy perjudicial para el país, el cual, en 2009, afectó a 744 665 habitantes y provocó pérdidas económicas que supusieron un gasto aproximado de 4.1 millones de dólares, además de provocar escasez de agua potable para algunas provincias, principalmente en Loja.

Los impactos generados por las sequías perjudican a varios sectores, entre ellos, el sector agropecuario, energético, entre otros. A nivel social, como señaló Gray (2009, como se citó en Núñez Cobo y Verbist, 2018), la sequía de 1996 incentivó a muchos habitantes de Loja a migrar, local e internacionalmente. Existen registros de grandes pérdidas debido a las sequías de la década de 1988 a 1998,

lo cual afectó a las provincias de Azuay, Guayas, Tungurahua, entre otras. Por otra parte, se encontraron algunos registros de grandes sequías en el Ecuador durante la época colonial, lo que significó grandes pérdidas de cultivos, enfermedades, hambruna y muertes (Núñez Cobo y Verbist, 2018).

Como consecuencia de las sequías, las pérdidas económicas han alcanzado los 400 millones de dólares en las últimas dos décadas (Loaiza, 2021), y llegando a afectar alrededor de 505 000 hectáreas de cultivos de los habitantes del sector. En su artículo, Loaiza (2021) detalló que, en el periodo 2000-2017, Ecuador perdió 102 millones de dólares relacionados con cultivos de arroz y 116 millones en cultivos de banano, entre otros.

En el sector energético, uno de los impactos más notorios es el racionamiento de energía eléctrica. El último racionamiento que sufrió Ecuador tuvo lugar en 2009, debido a la severa sequía que soportaba el país y afectaba directamente a la Central Hidroeléctrica Paute. De acuerdo con el diario El Mercurio (2009), los dirigentes empresariales estimaron pérdidas económicas de alrededor de 25 millones de dólares, por causa de los racionamientos.



Ilustración 4. Sequía en el río Tomebamba en Cuenca. Fuente: El Mercurio

1.1.2 Erosión de suelos

La erosión es el desgaste de suelo debido a procesos de la naturaleza, los cuales pueden estar influenciados por los humanos. Como principal factor erosivo natural se encuentran las precipitaciones y, en menor grado, el viento. Las precipitaciones más intensas son las causantes de las áreas más erosionadas, las cuales ocurren en los meses de junio hasta agosto, estos meses son los que evidencian mayores caudales en los ríos de la Sierra. Por su parte, el viento también afecta de manera localizada, al actuar con más presencia en los meses de junio a agosto.

Las actividades agrícolas hacen parte del factor erosivo humano. Este factor suele empeorar el proceso de erosión, debido a la mala práctica de laboreo y al uso de tractores en zonas no recomendadas. Como consecuencia, muchas provincias como Cotopaxi y Chimborazo presentan señales importantes de erosión en la zona. A esto se suman los factores que promueven la erosión como, por ejemplo, las pendientes de relieves. Este factor es muy común en la Sierra, puesto que la cordillera de los Andes provoca una gran pendiente (De Noni y Trujillo, 1986).

Según De Noni y Trujillo (1986), son tres los procesos que ocurren durante la erosión. En primer lugar, el escurrimiento difuso y concentrado afecta a muchas provincias de la Sierra. Una característica usual de este proceso son los paisajes de tonos claros y señales de superficies limpias junto a arañazos. En segundo lugar, el escurrimiento asociado con pequeños movimientos de masa presenta discontinuidades de suelos. Este proceso se evidencia en provincias como Pichincha y Carchi. Por último, se encuentra el proceso que genera movimientos en masa. En este caso, las áreas se visualizan con nichos, golpes de cucharas, además de presentar perfiles topográficos irregulares. Es común en parte de la Costa y Oriente.

La erosión en la Costa y Oriente no es muy elevada en comparación con la Sierra, debido a algunos factores mencionados previamente como, por ejemplo, la agricultura, las precipitaciones, las pendientes, entre otros. En la Costa, a excepción de algunas provincias, los procesos erosivos son pocos gracias al firme equilibrio morfodinámico (De Noni y Trujillo, 1986). Sin embargo, tiene algunos con una susceptibilidad alta a la erosión, como ejemplo de ello la

provincia de Santa Elena. El caso de Oriente es parecido, dado que tiene un equilibrio morfodinámico similar a la Costa. Además, el Oriente contiene una gran cantidad de vegetación y tiene muchas zonas protegidas; no obstante, existe riesgo de procesos de erosión debido al crecimiento de la agricultura masiva en la zona, lo que ocasionaría un empobrecimiento físico-químico irreversible de los suelos debido al sobrepisoteo del ganado (De Noni y Trujillo, 1986) (ver Ilustración 5).



Ilustración 5. Mapa de zonas susceptibles a erosión en Ecuador. Fuente: Ministerio del Ambiente, 2015

Actualmente, uno de los problemas que alerta al país es la erosión progresiva del río Coca, ubicado en el oriente del país. Es importante señalar que, además de generar un riesgo en las comunidades cercanas, estas producen daños a la Central Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair, y esta a su vez afecta la mayor parte de la producción energética del país (ver Ilustración 6).



Ilustración 6. Erosión de río Coca. Fuente: Primicias Ec

1.1.3 Deforestación

Según Sánchez y Reyes (2015), la deforestación es el proceso de destrucción de la superficie forestal, generalmente causado por actividades humanas como talas de árboles y obtención de suelos para uso no forestales como, por ejemplo, agricultura, uso urbano, entre otros. Otra causa son los incendios forestales que, aunque no siempre obedecen a actividades del ser humano, sí se ven influenciados por estas.

La deforestación es un hecho que ha afectado al Ecuador desde la llegada de los colonizadores españoles, alrededor del año 1530. Los principales afectados en esa época fueron los bosques andinos y, en décadas posteriores, se expandió a la región de la Costa y el Oriente (Sánchez y Reyes, 2015). Actualmente, esta problemática sigue aquejando al país. Se tiene registro de pérdidas de bosques de cerca de 1900 km² durante el periodo 1990-2008. Además, la cobertura de los bosques disminuyó en un 69.6 % de la superficie forestal potencial del país en 1990, en un 63.5 % en el año 2000, y, finalmente, en un 60.7 % en el 2008 (Sierra, 2013). Durante esta época, cerca del 99 % de área deforestada se empleó para el desarrollo de la agricultura y el 1 % restante se concentró en infraestructuras para las poblaciones de las áreas urbanas y rurales.

La aportación de los incendios forestales a la deforestación es muy significativa, esta es la razón por la que se estudian las zonas más susceptibles a los incendios

forestales. En su mayoría, estos son incitados por factores como el cambio climático, las sequías, los vientos fuertes, entre otros; los cuales provocan incendios forestales más frecuentes y severos en el país (Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, 2021). El Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica reportó que, durante el periodo 2012-2019, más del 80 % de los incendios forestales que ocurrieron en el país se dieron en la región Sierra, el 18 % en la región Costa y el 2 % en la región de la Amazonia y la región Insular. Las provincias más afectadas fueron la de Loja, Pichincha, Azuay y Chimborazo.

Tabla 1. Números de incendios forestales, periodo 2012-2019. Fuente: Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, 2021

Provincia	Número de incendios forestales	Cobertura vegetal quemada (Ha)
Azuay	443	1 177.53
Bolívar	61	182.51
Cañar	202	576.84
Carchi	53	738.38
Chimborazo	144	2 564.72
Cotopaxi	83	1 283.80
El Oro	164	1 340.23
Esmeraldas	38	334.00
Galápagos	2	5.00
Guayas	385	2 845.39
Imbabura	165	1 662.16
Loja	192	6 024.00
Los Ríos	33	140.05
Manabí	29	661.05
Morona Santiago	4	102.50
Napo	3	1.08
Pichincha	179	4 220.05
Santa Elena	13	97.03
Sucumbíos	1	20.00
Tungurahua	133	1 800.60
Zamora Chinchipe	9	128.00
Total	2 336	27 904.91

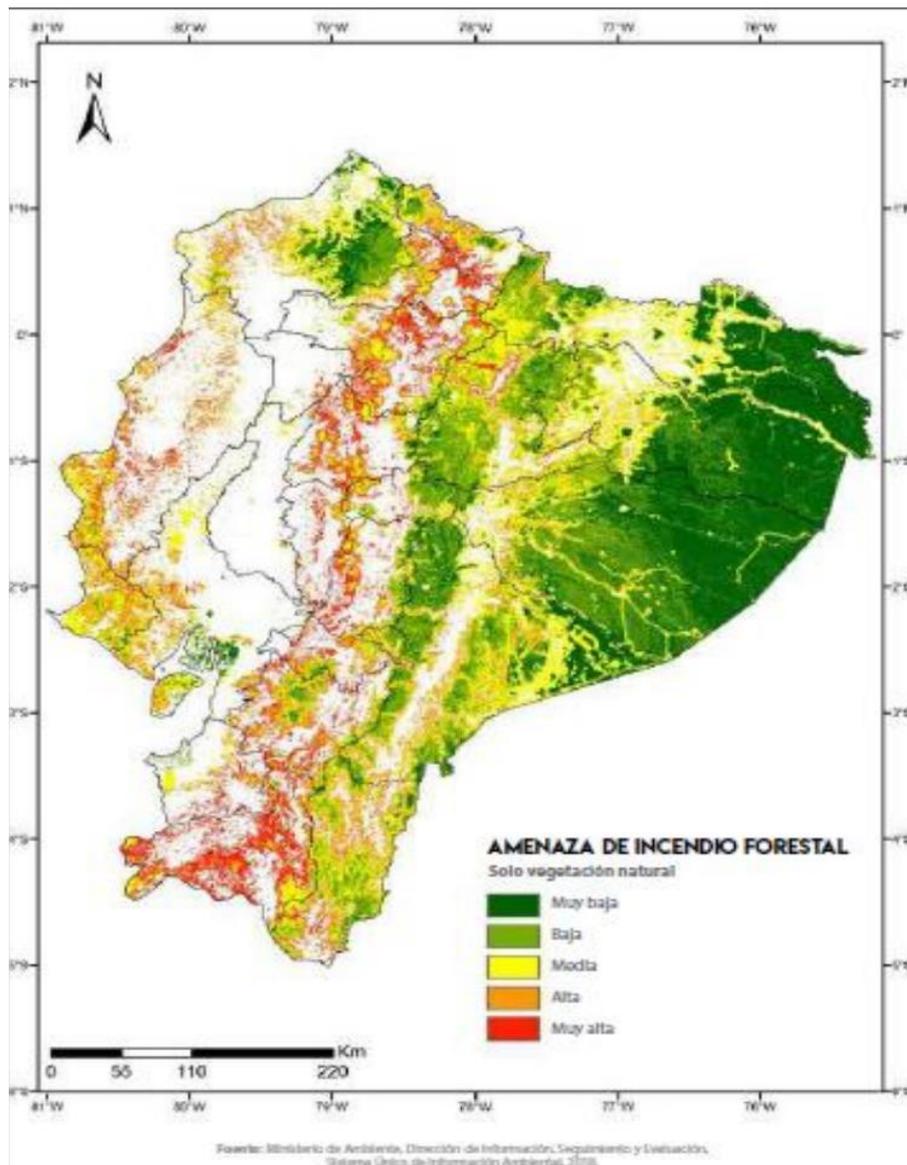


Ilustración 7. Mapa de amenaza de incendios forestales de Ecuador. Fuente: Ministerio del Ambiente, Agua y Transacción Ecológica, 2021

A pesar de los riesgos latentes que vive el país con respecto a la deforestación, la tasa de regeneración de bosque aumentó en las últimas décadas y se prevé que la deforestación en áreas de baja densidad y densidad media poblacional caiga drásticamente. Pese a ello, la deforestación no dejar de ser un tema preocupante a nivel mundial y local. Entre las principales consecuencias se encuentra la desertificación, dado que provoca alteraciones en el ciclo hidrológico y, además, promueve el desarrollo de otros fenómenos como las sequías, la erosión, entre otros.

1.1.4 Cambio climático

El cambio climático representa un problema mundial que se ha incrementado a través de los años. Entre los factores que lo agravan se encuentra el aumento de gases de efecto invernadero (GEI) provocado por las actividades humanas, este es uno de los responsables del calentamiento en la superficie. Este efecto se relaciona con la desertificación de manera bidireccional, es decir, mientras que la desertificación afecta el balance de las emisiones de GEI por distintas acciones que se ejecutan en el proceso de desertificación, el cambio climático refuerza el proceso de desertificación mediante el aumento del efecto albedo (Valderrama, 2017).

El impacto que trae consigo el cambio climático afecta al mundo entero y, por supuesto, Ecuador no es la excepción. En el estudio relacionado con el cambio climático en el Ecuador, realizado por Cáceres et al. (1998), se expuso que las precipitaciones tienen una inclinación a la disminución, además de tener irregularidades en la tendencia de precipitación en el tiempo. Además, los autores mencionaron que las temperaturas mínimas y máximas tienden a ser más altas, lo que evidenciaría los impactos del cambio climático. Otro dato relevante son las temperaturas máximas, las cuales son de mayor intensidad en la región Sierra que en la región Costa.

El cambio climático es un tema que no se puede dejar a un lado, debido a las consecuencias que trae consigo. Hay suficiente evidencia científica que respalda este problema a nivel global. A nivel local, existen estudios como el de Cáceres et al. (1998), en donde se evidencian las variaciones que está provocando el cambio climático. Como se mencionó anteriormente, la desertificación está fuertemente ligada al cambio climático. Como un ciclo, la desertificación genera cambios climáticos y este, a su vez, provoca más zonas desertificadas.

1.2 Desertificación en la provincia de Azuay

1.2.1 Generalidades de la provincia de Azuay

Azuay es una de las provincias de Ecuador ubicada en la parte sur de la región interandina. Su territorio está rodeado por dos cordilleras: la Occidental y la Oriental, las cuales son las responsables de la formación de sus representativos

valles poblados desde la época colonial (Gobierno Provincial del Azuay, 2015). La provincia abarca un aproximado de 8500 km² de superficie.

Su territorio está diferenciado por dos zonas: el este, dominado por los Andes orientales y occidentales; y el oeste, influenciado por la Costa. La zona con la altitud más baja es de 37 m s. n. m., que se encuentra en la zona influenciada por la Costa; y la altitud más alta se encuentra a 4482 m s. n. m., ubicada en parte de las cordilleras. De acuerdo con el último censo realizado en 2010, la población consta de 712 127 habitantes, el 54 % ubicado en la zona urbana y el 46 % en la zona rural. En su territorio fluyen cuerpos de aguas muy importantes, a saber: el río Jubones y el río Paute, este último de suma importancia para el país en temas energéticos (ver Ilustración 8).



Ilustración 8. Provincia de Azuay. Adaptado de: Wikipedia

Clima

El clima de la provincia de Azuay es muy variado, debido a la gran variedad de factores como altitud, influencia de las regiones, ubicación, entre otros. La mayor influencia en los tipos de clima viene por la cordillera de los Andes y por la

vegetación subtropical que conforman Azuay (Pacheco, 2015). En total, se puede diferenciar siete tipos de climas, el más predominante: el ecuatorial mesotérmico semihúmedo, el cual representa más del 50 % de la superficie con este tipo de clima. A continuación, en la Tabla 2 e Ilustración 9 se detallan los tipos clima que tiene la provincia de Azuay.

Tabla 2. Tipos de climas de Azuay. Fuente: Ministerio de Agricultura y Ganadería [MAGAP], 2002. Obtenido: Plan de desarrollo y ordenamiento de Azuay, 2015-2030

Tipo de clima	Área (Ha)	Altitud (m s. n. m.)	Precipitaciones (mm)	Temperatura (C°)
Ecuatorial mesotérmico seco	50 500	1100 - 2000	750 - 1500	12 - 22
Ecuatorial mesotérmico semihúmedo	489 500	2200 - 3000	500 - 1600	11 – 15
Ecuatorial de alta montaña	254 800	+ 3200	1000 - 2000	≈ 8
Nival	12 750	+ 3500	+ 1000	-2
Tropical megatérmico húmedo	12 960	1500 - 200	1000 - 1200	+ 24
Tropical megatérmico semihúmedo	39 900	500 - 80	1000 y 2000	+ 24
Tropical megatérmico seco	2497	0 - 80	500 - 1000	+ 24

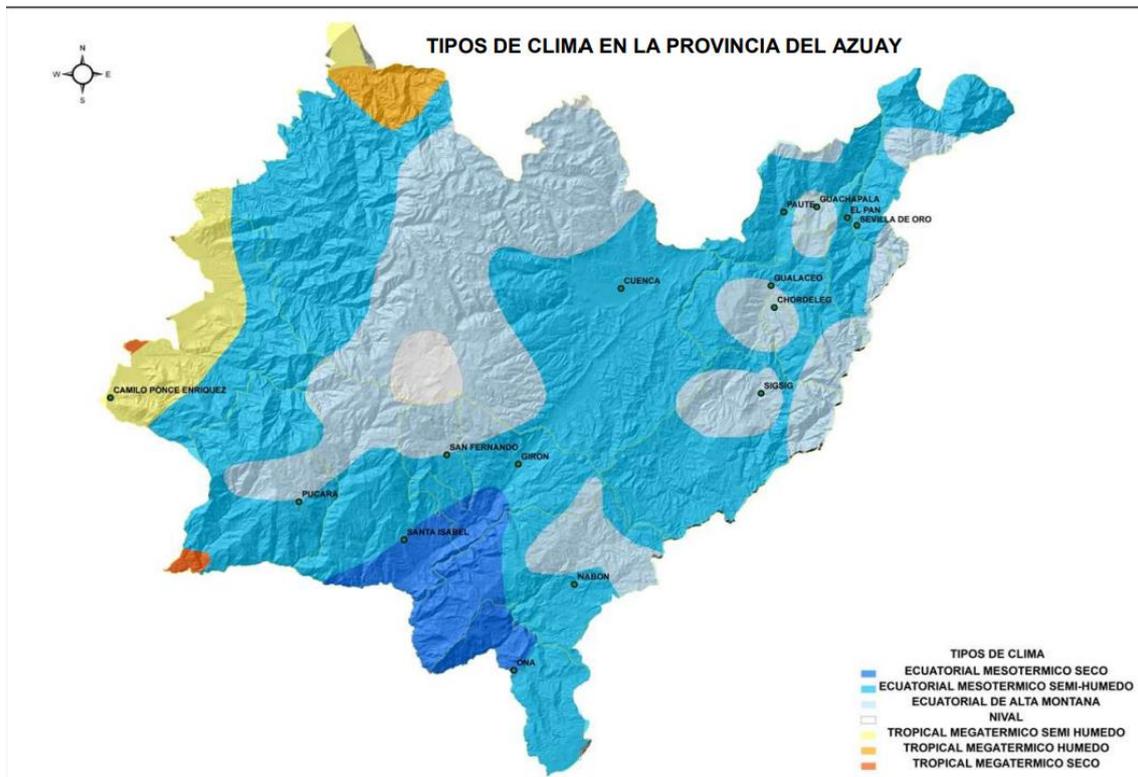


Ilustración 9. Tipos de clima en la provincia del Azuay. Fuente: MAGAP, 2002. Obtenido: Plan de desarrollo y ordenamiento de Azuay, 2015-2030

Temperatura

La temperatura está marcada por dos zonas: la de Occidente, la cual representa las temperaturas más altas que oscilan entre los 20 °C y 33 °C; mientras que la Andina, que se caracteriza por generar recursos hídricos, cuenta con temperaturas que oscilan entre los 10 °C y 28 °C (Pacheco, 2015). La temperatura promedio anual se estima entre 13 °C y 14 °C. En el caso de las temperaturas más bajas, estas pueden llegar hasta 2 °C o 4 °C; mientras que las temperaturas más altas podrían llegar hasta los 24 °C o 28 °C. Sin embargo, estas temperaturas están sujetas a cambios en el futuro, debido a cambios climáticos. A continuación, en la Ilustración 10 se muestra la curva de temperatura de promedio anual, en la Tabla 3 se exponen los rangos de temperatura y áreas, y en la Ilustración 11 su respectivo mapa.

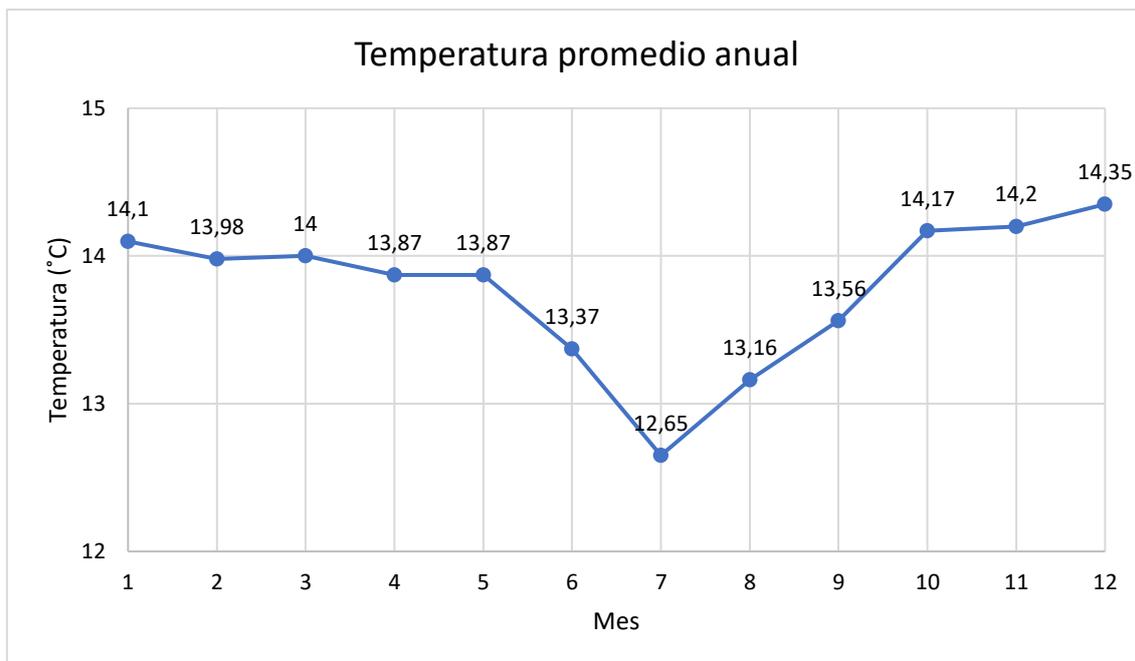


Ilustración 10. Temperatura promedio anual de Azuay. Fuente: INFOPLAN, 2006. Obtenido: Plan de desarrollo y ordenamiento territorial de Azuay, 2015-2030

Tabla 3. Rango de temperatura y áreas en Azuay. Fuente: INFOPLAN, 2005. Obtenido: Plan de desarrollo y ordenamiento de Azuay, 2015-2030

Rangos de temperatura (°C)	Área (Ha)
2-4	11 824
4-6	46 535
6-8	67 179
8-10	131 326
10-12	238 553
12-14	104 495
14-16	71 258
16-18	50 258
18-20	50 971
20-22	33 932
22-24	27 873
24-26	15 070

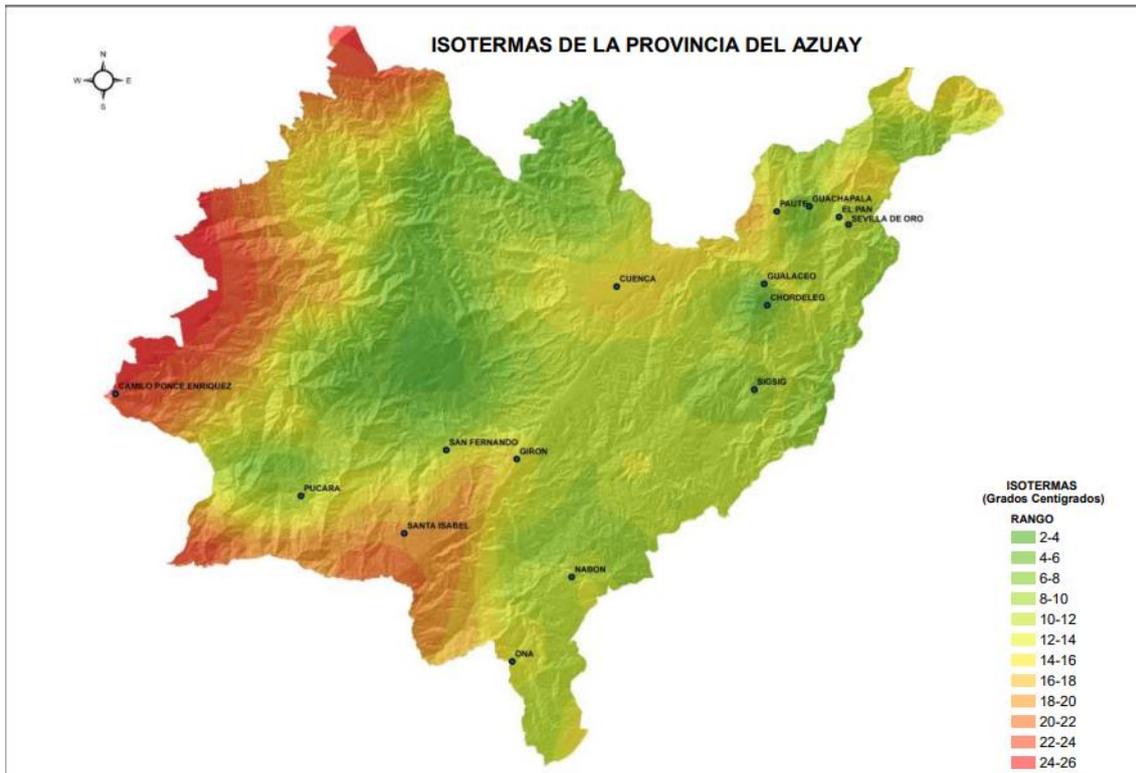


Ilustración 11. Mapa de isotermas de la provincia de Azuay. Fuente: INFOPLAN, 2006.

Obtenido: Plan de desarrollo y ordenamiento territorial de Azuay, 2015-2030

En esta provincia se encuentra algunas obras de suma importancia en temas de energía eléctrica, entre ellas, el complejo hidroeléctrico Paute-Integral, el cual consta de varias hidroeléctricas ubicadas en esta provincia. Este gran complejo hidroeléctrico es alimentado por el río Paute, uno de los cursos fluviales más importantes a nivel nacional.

Precipitación

En promedio, las precipitaciones anuales de la provincia de Azuay son aproximadamente 940 mm/año (Inventario de los Recursos Hídricos de Azuay [IRHA], 2006, como se citó en el Plan de desarrollo y ordenamiento territorial de Azuay, 2015). En la Ilustración 12, sobre la precipitación anual promedio de la provincia de Azuay, se constata que los meses con menos precipitaciones son junio-noviembre y los meses con mayores precipitaciones son diciembre-mayo. Asimismo, se evidencia que algunos meses coinciden con la temporada de estiaje que sufre la región anualmente.

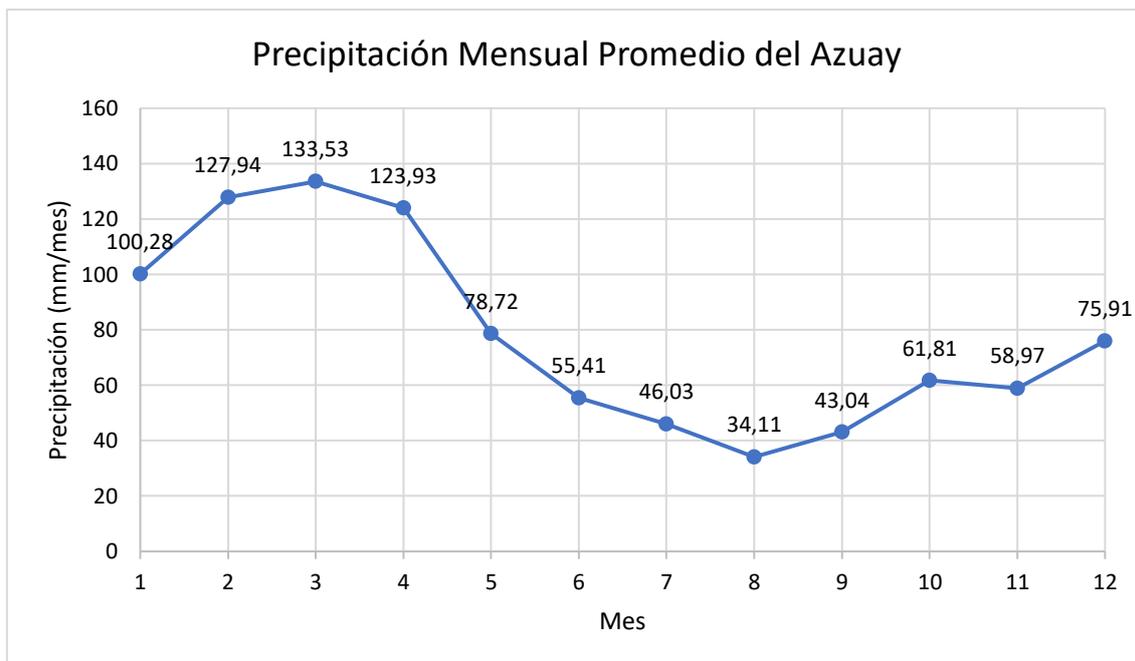


Ilustración 12. Curva de precipitación mensual promedio de Azuay. Fuente: IRHA, 2006.

Obtenido: Plan de desarrollo y ordenamiento territorial de Azuay, 2015-2030

Al traducir el valor de la precipitación anual promedio, se obtuvo que la provincia de Azuay tiene una buena generación de recursos hídricos (ver Tabla 4); sin embargo, en el mapa de isoyetas (ver Ilustración 13) se observa que la distribución de lluvias no es uniforme, es decir, existen zonas en las que llueve muy poco y otras en las que llueve mucho más.

Tabla 4. Rango de precipitaciones en Azuay. Fuente: ODEPLAN 2003. Obtenido: Atlas de la provincia del Azuay

Rango de precipitaciones anuales (mm)	Área (Ha)	Porcentaje de área (%)
0-500	48 296	5.5
500-750	134 105	15.4
750-1000	229 187	26.3
1000-1250	263 864	30.2
1250-1500	101 751	11.7
1500-1750	38 880	4.5
1750-2000	17 984	2.1
2000-2500	16 971	1.9
2500-3000	15 356	1.8

3000-4000	5483	0.6
-----------	------	-----

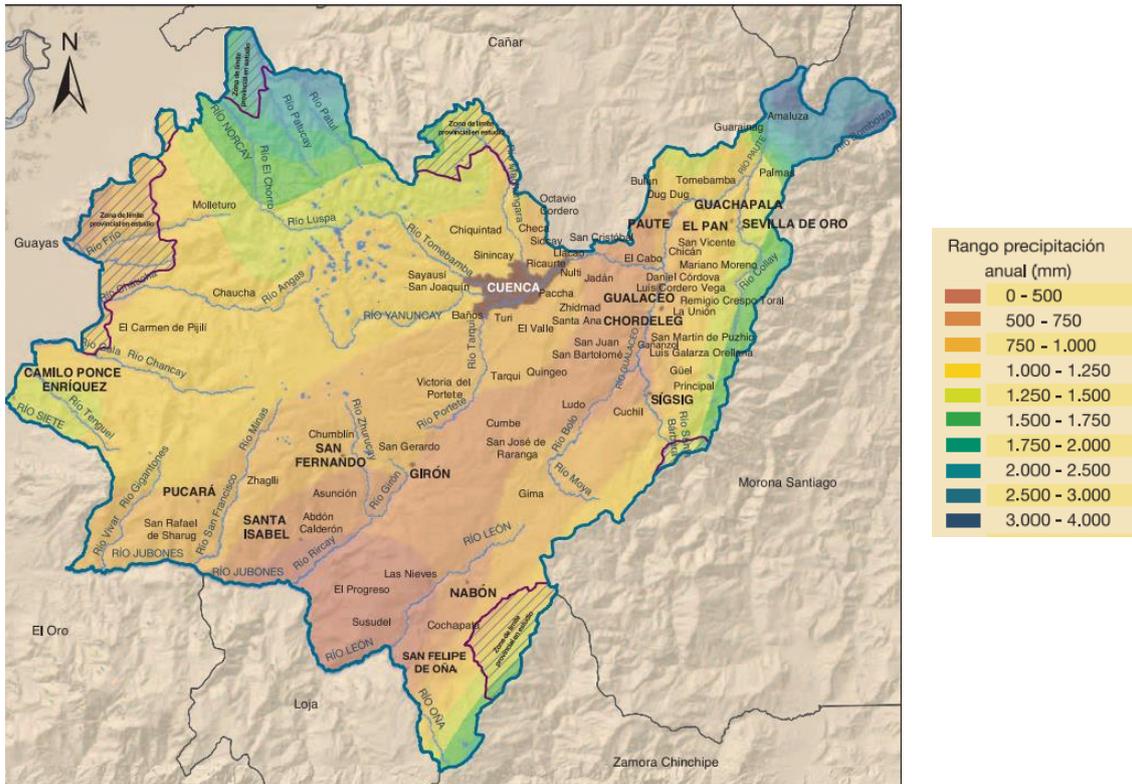


Ilustración 13. Mapa de isoyetas de Azuay. Fuente: ODEPLAN, 2003. Obtenido: Atlas de la provincia de Azuay

Evapotranspiración

La evapotranspiración se define como el parámetro climático que representa la evaporación a la atmósfera del agua del suelo y de la superficie de las plantas. La evapotranspiración promedio anual de la provincia de Azuay es de 695 mm, con un promedio mensual de 58 mm. A continuación, en la Ilustración 14 se muestra la curva de evapotranspiración promedio de la provincia de Azuay, donde se observa que julio es el mes con menor tasa de evapotranspiración y el mes de diciembre es el que posee la mayor tasa de evapotranspiración. Además, se visualiza una tendencia similar con la Ilustración 10 (temperatura promedio anual), debido a que la evapotranspiración actúa en función de la temperatura (IRHA, 2006, como se citó en Plan de desarrollo y ordenamiento territorial de Azuay, 2015).



Ilustración 14. Curva de evapotranspiración promedio de Azuay. Fuente: IRHA, 2006. Obtenido: Plan de desarrollo y ordenamiento territorial de Azuay, 2015-2030

Meses secos

En la Ilustración 15 se muestran las zonas con más meses con lluvias y otras con más meses sin lluvias. Se puede notar que la mayoría de las zonas consta con un promedio de 8 meses sin lluvias, además de que una zona de interés como lo es el río Paute cuenta con un aproximado de 3 a 4 meses sin lluvias en algunos tramos. Al relacionar la evapotranspiración (ver Ilustración 14) con el promedio de precipitaciones (ver Ilustración 12), fue posible inferir que existe un déficit de recurso hídrico en algunos meses, debido a que la cantidad de agua que se evapora no se recupera por completo mediante las precipitaciones. A esto se le suma que las precipitaciones no son uniformes en la provincia, por lo que los problemas de disponibilidad de agua varían de mejor o peor según las zonas que tengan más o menos meses sin lluvias (Gobierno Provincial de Azuay, 2015).

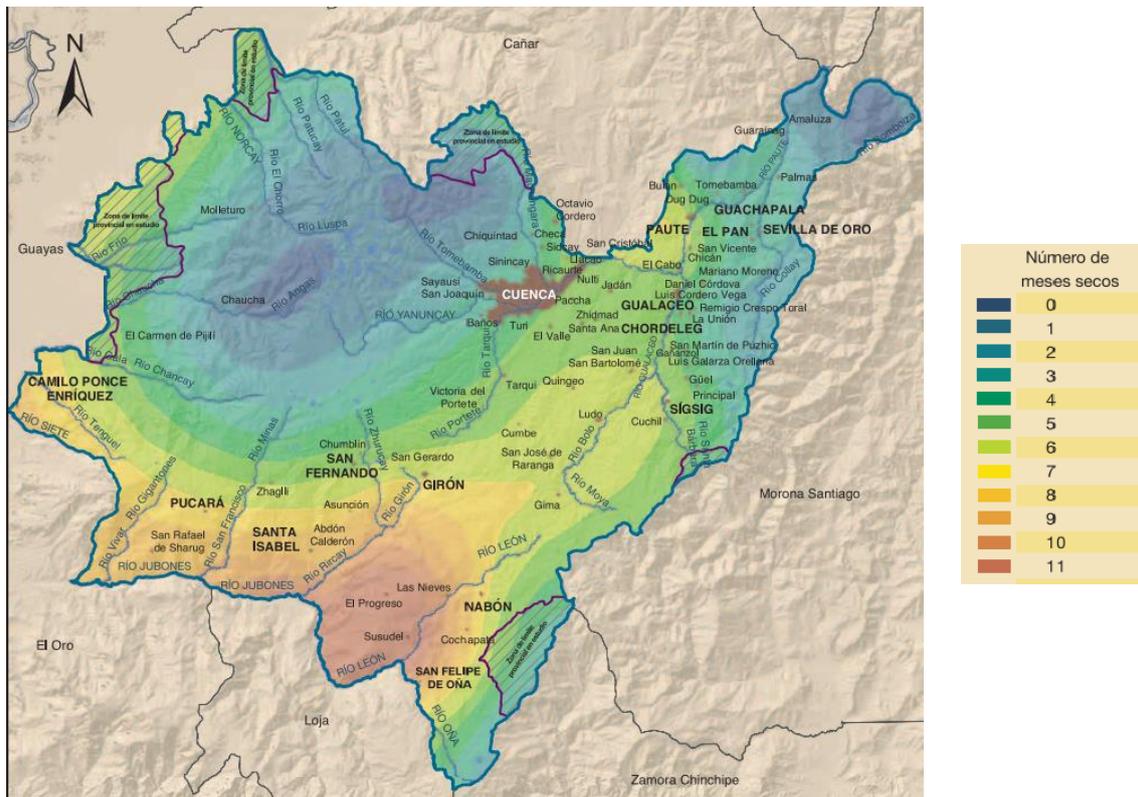


Ilustración 15. Mapa de Azuay según los meses secos. Fuente: ODEPLAN, 2003. Obtenido: Atlas de la provincia de Azuay

Red hídrica

Debido a la cordillera de los Andes, la provincia del Azuay está dividida en tres regiones geográficas: la zona occidental, la zona central y la zona oriental, cada una influenciada por el régimen más cercano a él. Su orografía está comprendida principalmente por la cuenca del Paute y la de Jubones. Dicho esto, a continuación se describen los ejes principales fluviales de la provincia de Azuay:

- Río Paute: está conformado por un gran número de afluentes provenientes del occidente y del suroriente. Este pertenece al sistema hídrico del río Santiago, el cual integra la gran cuenca del Amazonas, cuya desembocadura final es el Atlántico (Gobierno Provincial del Azuay, 2015).
- Río Jubones: pertenece al sistema hídrico de Jubones y se ubica en el sur de la provincia. Su recorrido es este-oeste. Tiene varios afluentes, pero en menor cantidad que el río Paute y su desembocadura final es en el Pacífico (Gobierno Provincial de Azuay, 2015).

A continuación, en la Tabla 5 se exponen todos los sistemas hídricos, sus respectivas cuencas y subcuencas, y su división (ver ilustraciones 16 y 17).

Tabla 5. Sistemas hídricos, cuencas y subcuencas de la provincia de Azuay. Fuente: INFOPLAN, 2006. Obtenido: Plan de desarrollo y ordenamiento territorial de Azuay, 2015-2030

Sistema	Cuenca	Subcuenca	Cobertura (%)
Santiago	Paute	Yanucay	4.81
Santiago	Paute	Tomebamba	4.37
Santiago	Paute	Tarqui	5.51
Santiago	Paute	Sidcay	0.50
Santiago	Paute	Cuenca	1.40
Santiago	Paute	Paute	5.42
Santiago	Paute	Collay	2.72
Santiago	Paute	Magdalena	0.51
Santiago	Paute	Machángara	3.67
Santiago	Paute	Jadán	3.38
Santiago	Paute	Santa Bárbara	10.86
Santiago	Santiago	Zamora	1.79
Jubones	Jubones	D.M. Jubones	1.91
Jubones	Jubones	Vivar	1.61
Jubones	Jubones	San Francisco	4.13
Jubones	Jubones	León	9.21
Jubones	Jubones	Rircay	9.48
Jubones	Jubones	Minas	1.24
Naranjal Pagua	San Pablo	San Pablo	0.50
Naranjal Pagua	Tenguel	Tenguel	1.46
Naranjal Pagua	Siete	Siete	0.74
Naranjal Pagua	Jagua	Jagua	2.38
Naranjal Pagua	Balao	Balao	6.67
Naranjal Pagua	Naranjal	Naranjal	2.50
Naranjal Pagua	Gala	Gala	4.78
Cañar	Cañar	Cañar	8.46



Ilustración 16. Sistemas hídricos de la provincia de Azuay. Fuente: INFOPLAN, 2006. Obtenido: Plan de desarrollo y ordenamiento territorial del Azuay, 2015-2030



Ilustración 17. Cuencas y subcuencas de la provincia del Azuay. Fuente: INFOPLAN, 2006. Obtenido: Plan de desarrollo y ordenamiento territorial del Azuay, 2015-2030

Uso de suelo

En el estudio realizado por la Prefectura de Azuay, en torno al plan de desarrollo y ordenamiento territorial de la provincia, se clasificó el uso y cobertura de suelo de la siguiente manera: páramo, bosque nativo, plantación forestal, vegetación herbácea, pastizal, cultivos anuales, cultivos semipermanentes, cultivos permanentes, mosaico agropecuario, área erosionada y área poblada - infraestructura.

- Páramo: ecosistema alpino restringido a zonas altas, resistente a vientos y heladas, y a temperaturas menores a 5 °C. Predominio de pajonales, arbustos.
- Bosque nativo: ecosistema arbóreo natural primario y secundario que se encuentra sin intervención u ocupación humana. En él solo se encuentran especies nativas de la zona en que se ubica.
- Plantación forestal: formación boscosa con gran influencia humana, en donde se puede encontrar árboles nativos o introducido. Aquí se observa una gran actividad de la industria maderera. En este caso, la mayoría de los árboles son plantados para evitar erosión eólica, un ejemplo de ello son los bosques de eucalipto. Sin embargo, también hay árboles plantados con el fin de la explotación maderera, como lo son los bosques de pino (Gobierno Provincial de Azuay, 2015).
- Vegetación herbácea: vegetación compuesta por plantas nativas de crecimiento acelerado que no necesitan atención especial y son utilizadas rara vez para pastoreo.
- Pastizal: grandes áreas empleadas para la ganadería.
- Cultivo anual: área dedicada a los cultivos agrícolas, cuyo objetivo es ser cosechados una o más veces al año.
- Cultivo semipermanente: área dedicada a los cultivos agrícolas, cuyo ciclo vegetativo dura entre 1 y 3 años.
- Cultivo permanente: área dedicada a los cultivos agrícolas, cuyo ciclo vegetativo dura más de 3 años.
- Mosaico agropecuario: área dedicada a cultivos de maíz, frutas, cacao, cultivos de ciclo corto, entre otros.

- Áreas erosionadas: áreas que han estado sujetas a procesos de erosión de distintas formas en las que se observa un nivel muy bajo a nulo de vegetación.
- Área poblada - infraestructura: áreas habitadas por personas o zonas que contienen obras civiles.

A continuación, en la Tabla 6 e Ilustración 18 se muestran los usos de suelos y el porcentaje de cobertura en la provincia de Azuay.

Tabla 6. Porcentaje de uso y cobertura del suelo en la provincia de Azuay. Fuente: MAE, MAGAP, SENPLADES, 2015. Obtenido: Plan de desarrollo y ordenamiento territorial de Azuay, 2015-2030

Uso y cobertura del suelo	Porcentaje de cobertura (%)
Páramo	17.6
Bosque nativo	0.8
Plantación forestal	8.6
Vegetación herbácea	1.3
Pastizal	1.3
Cultivo anual	0.3
Cultivo semipermanente	2.2
Cultivo permanente	27.1
Mosaico agropecuario	37.1
Áreas erosionadas	1.0
Área poblada - infraestructura	0.4
Cuerpos de agua	0.6



Ilustración 18. Mapa de uso y cobertura del suelo de la provincia de Azuay. Fuente: MAE, MAGAP, SENPLADES, 2015. Obtenido: Plan de desarrollo y ordenamiento territorial de Azuay, 2015-2030

1.2.2 Proceso de desertificación en la provincia del Azuay

Con respecto a la desertificación de la provincia de Azuay, existen datos que la respaldan desde antes del año 2000, el gobierno provincial de la provincia es uno de los que ha aportado con investigaciones para analizar el estado de la provincia frente a este problema. De esa manera, se han reportado provincias que tiene menos del 10 % de cobertura natural en comparación con años anteriores, como lo es el cantón Guachapala. Otro dato relevante es que los suelos con proceso de erosión avanzados de la provincia del Azuay alcanzan un 3 % del territorio azuayo (Portilla, Noguera y Pacheco, 2014).

Entre los estudios relacionados con la desertificación de la provincia del Azuay se encontró la investigación de Portilla, Noguera y Pacheco (2014), en donde se evaluaron las zonas con mayor sensibilidad a la desertificación en 4 años distintos, para el modelo desarrollado se empleó de base datos de un proyecto europeo *Mediterranean Desertification and Land Use (DALUS)*, así como varios índices como, por ejemplo, el índice de calidad de suelo, índice de calidad de

clima e índice de calidad de la vegetación. Todos estos, corroborados con datos de campos y datos climáticos.

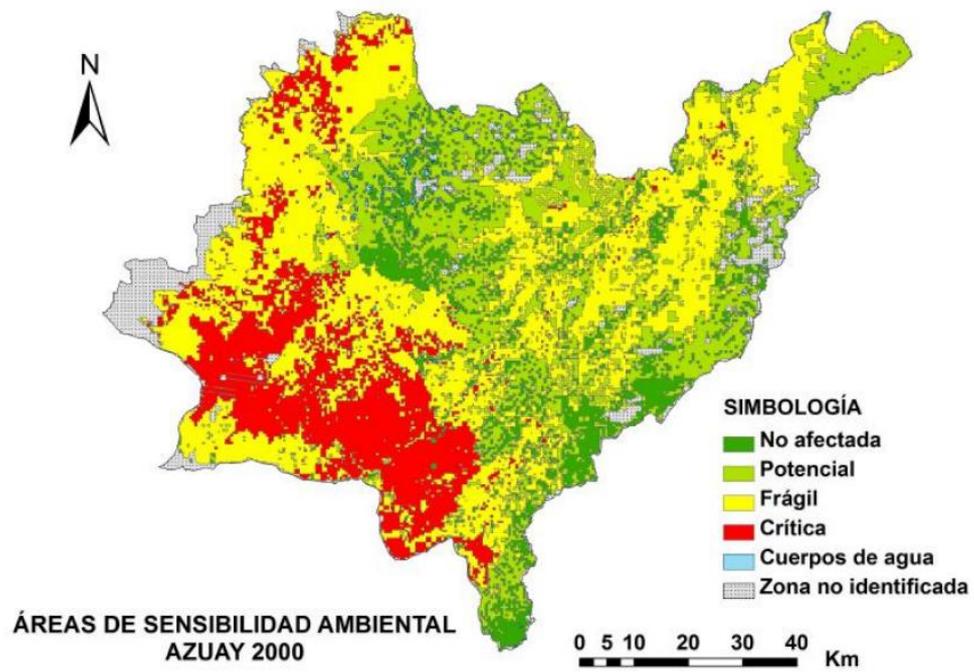


Ilustración 19. Mapa de sensibilidad ante la desertificación de la provincia de Azuay en el año 2000. Fuente: Portilla et al. (2014)

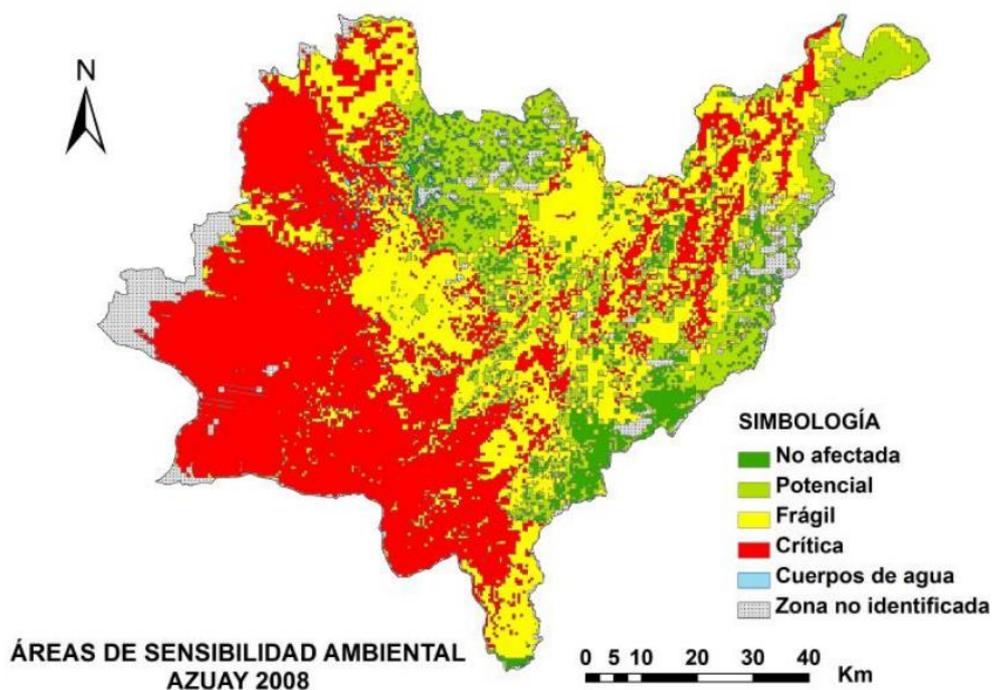


Ilustración 20. Mapa de sensibilidad ante la desertificación de la provincia de Azuay en el año 2008. Fuente: Portilla et al. (2014)

En las ilustraciones 19 y 20 se observa el aumento de la sensibilidad ante la desertificación de la provincia de Azuay durante el periodo 2000-2008, principalmente en la cuenca alta. Sin embargo, la cuenca baja también aumentó, pero de manera dispersa, lo que no le resta importancia debido a que la tendencia es a que los puntos dispersos se unan.

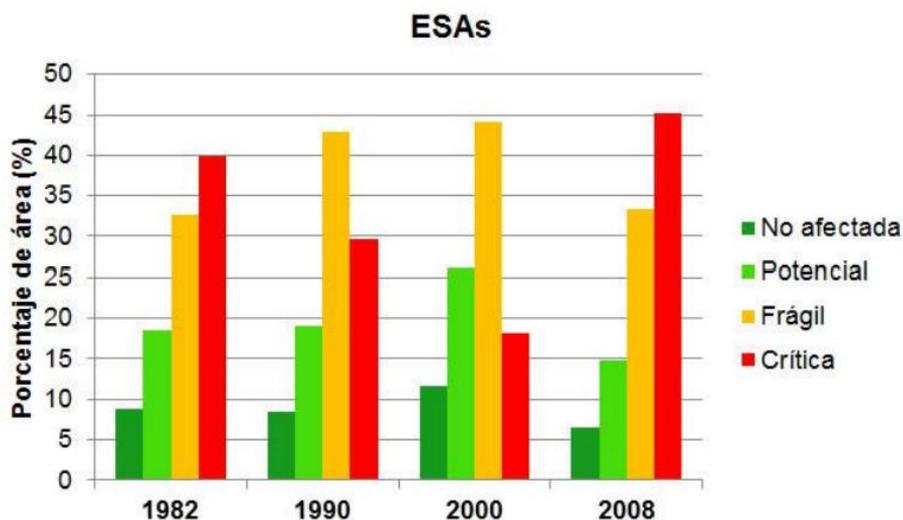


Ilustración 21. Cuadro del porcentaje de superficies sensibles a la desertificación en distintos años. Fuente: Portilla et al. (2014)

De acuerdo con la Ilustración 21, en el año 1982 existía una cantidad relevante de áreas sensibles a la desertificación, la cual disminuyó en el año 2000. Sin embargo, en el 2008 recuperó el porcentaje de área crítica sensible a la desertificación y hasta superó lo registrado en 1982.

Si bien el estudio de Portilla et al. (2014) es muy importante y demuestra la variabilidad de estos procesos, está limitado a datos de 2008. Por esta razón, se propuso recopilar datos más actuales de los procesos comunes que suceden en los procesos de desertificación enfocados en áreas de importancia y alineados con el tema principal, como lo es la provincia de Azuay, específicamente la cuenca del río Paute. Asimismo, se buscó estimar las afectaciones futuras, por lo que se tomó en cuenta los estudios realizados con modelos que se encargan de predecir estos procesos en el futuro. Lo anterior, en aras de calcular los niveles de afectación de estos procesos y tener una idea más clara sobre su relación con el proceso de desertificación.

Sequía en la provincia de Azuay

La provincia del Azuay lleva acarreado el problema de las sequías hace mucho tiempo. Aunque hay épocas en las que no se hace notar, hay otras en las que afecta de manera significativa a la provincia, un ejemplo de esto es la baja producción de las centrales hidroeléctricas. Si la sequía era tan grave, podía

conducir a los racionamientos de energía. Esto era común en los años anteriores al año 2010, en el cual se realizó el último racionamiento energético.

En tiempos de racionamientos energéticos, la generación proveída por las termoeléctricas no lograba satisfacer la demanda energética del país, ni la compra de energía a países vecinos, por lo que no tenía más opciones que realizar cortes de luz programados. En tiempos más actuales, las implementaciones de más hidroeléctricas han logrado suplir la demanda, pero aún el país necesita de la generación energética de las termoeléctricas y la compra de energía de países vecinos para satisfacer la demanda energética nacional, especialmente en temporada de estiaje o sequía.

A lo largo del tiempo, se ha realizado varios estudios sobre la amenaza de las sequías en la provincia de Azuay, con especial énfasis a la región de la cuenca del río Paute, debido a que en ese lugar se encuentra el complejo hidroeléctrico Paute-Integral, el segundo generador de energía a nivel nacional después de la hidroeléctrica Coca Codo Sinclair.

Sequías históricas

En la cuenca del río Paute se han realizado estudios para su caracterización. Para este trabajo se tomaron los resultados de la investigación desarrollada por Valarezo (2017), a través de la cual se caracterizaron las sequías meteorológicas históricas mediante el Índice de Precipitación Estandarizado (IPE o SPI), y con datos de algunas de las estaciones pluviométricas ubicadas en distintas partes dentro de la cuenca.

La autora utilizó el índice IPE, creado por McKee en 1993 para cuantificar el déficit de precipitaciones y, de esa manera, planear o evaluar las sequías en una región. La Organización Meteorológica Mundial (OMM) recomendó este indicador para caracterizar sequías (Valarezo, 2017). Los valores empleados para la caracterización van desde el +2 al -2, como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Categorización de IPE. Fuente: Valarezo (2017)

IPE	Categoría
Extremadamente húmedo	> 1.99
Muy húmedo	> 1.49

Moderadamente húmedo	> 1.00
Normal	-0.99 a +0.99
Moderadamente seco	< -1.00
Severamente seco	< -1.49
Extremadamente seco	< -1.99

Además, se usó la caracterización de los cuatro regímenes de precipitación presentes en la cuenca, realizada por Celleri et al. (2007): Unimodal 1 (UM1), Unimodal 2 (UM2), Bimodal 1 (BM1) y Bimodal 2 (BM2). Cada uno cuenta con una influencia y característica diferente (ver Ilustración 22).

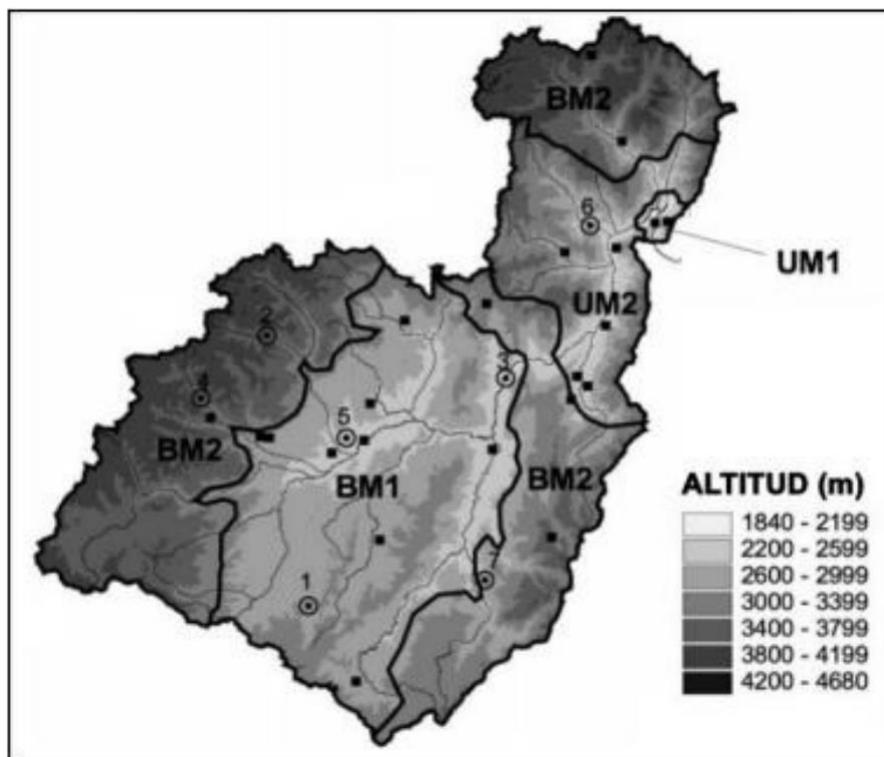


Ilustración 22. Regímenes de precipitaciones en la cuenca del río Paute. Fuente: Celleri et al. (2007)

Las características de cada régimen varían según la cantidad de precipitación, además de la peculiaridad de los picos de precipitaciones anuales que estas tienen. En este caso, las unimodales tienen un solo pico de precipitación anual y las bimodales tienen dos picos (ver Ilustración 23).

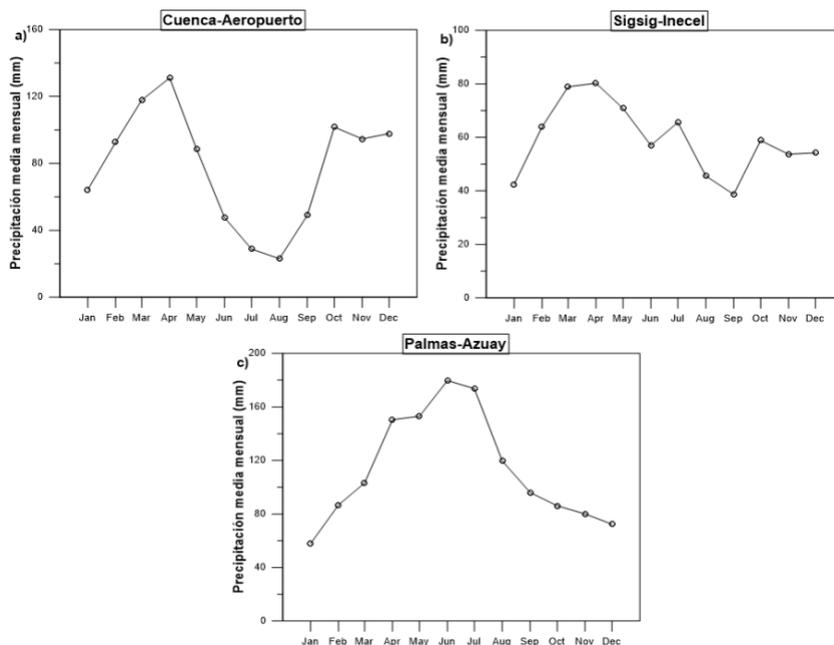


Ilustración 23. Ejemplos de regímenes en cuenca del río Paute. Fuente: INAMHI, 2013.

Obtenido: Valarezo (2017)

Por otra parte las estaciones empleadas para la caracterización fueron ocho y se encuentran distribuidas entre la cuenca baja, cuenca media y cuenca alta del río Paute (ver Ilustración 8).

Tabla 8. Estaciones de estudio. Fuente: Valarezo (2017)

Nombre de estación	Altura (m s. n. m.)	Régimen	Cuenca
El Labrado	3424	BM2	Alta
Piscícola Chirimichay	3503	BM2	Alta
Sigsig-Inecel	2613	BM1	Media
Cuenca- Aeropuerto	2528	BM1	Media
Ricaurte-Cuenca	2437	BM1	Media
Cumbe	2722	BM1	Media
Paute	2162	BM1	Media
Palmas-Azuay	2412	UM2	Baja

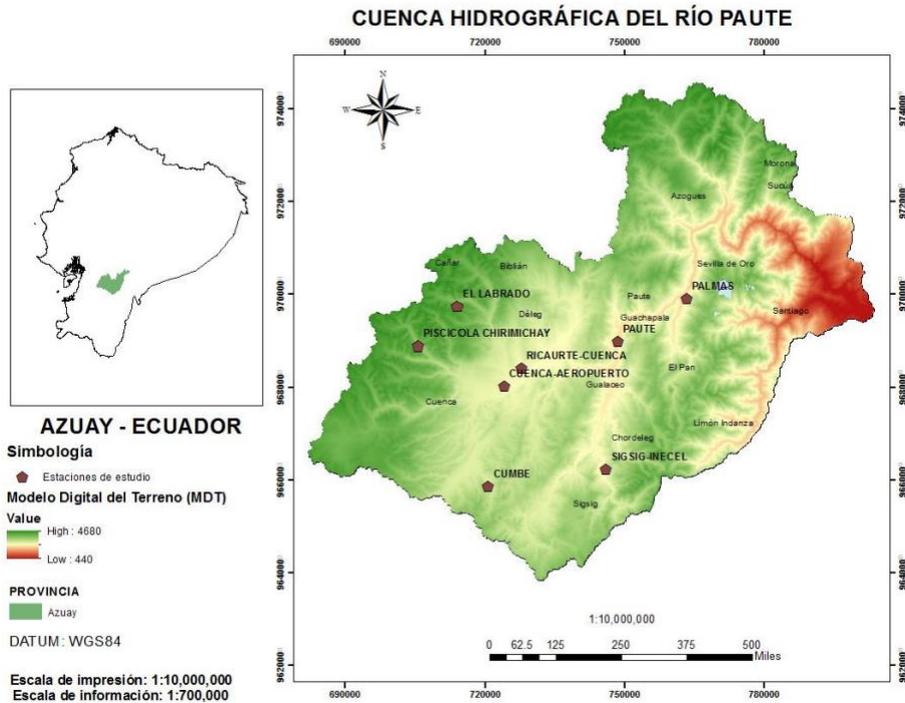
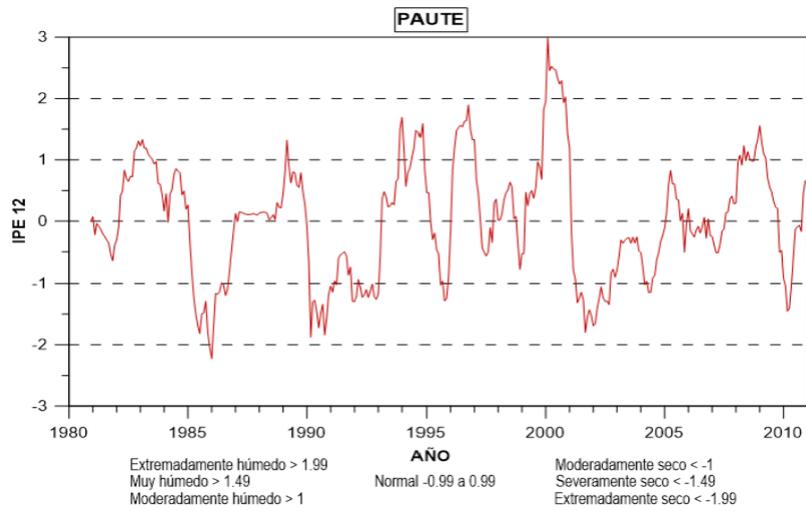
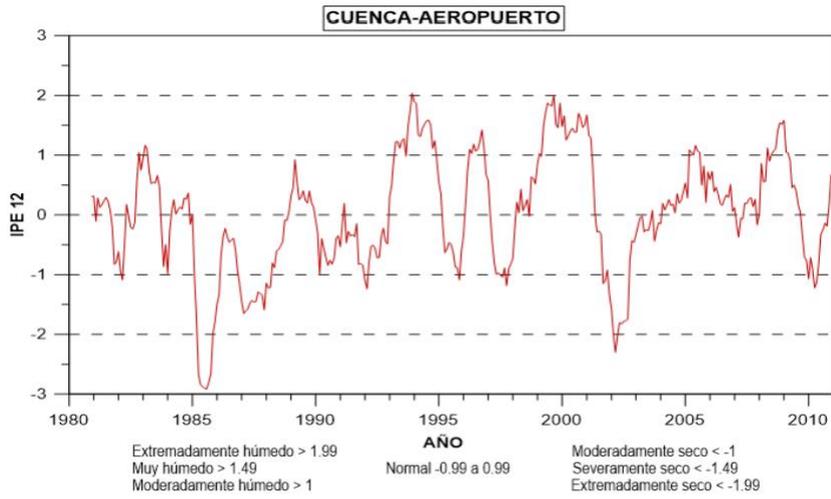
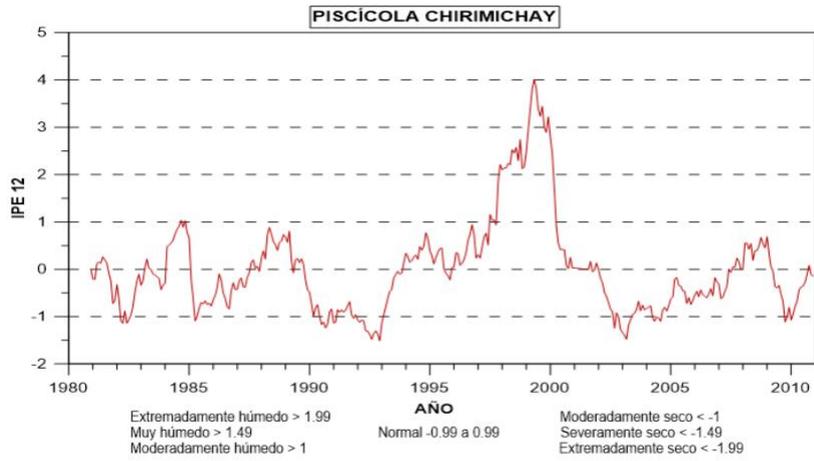


Ilustración 24. Ubicación de estaciones pluviométrica. Fuente: Instituto Geográfico Militar [IGM], 2004. Obtenido: Valarezo (2017)

Con los datos de las estaciones pluviométricas se determinaron los IPE de cada año en las estaciones (ver Ilustración 24). Los datos van desde 1980 a 2011, en los cuales están representados algunas de las sequías más representativas que ha tenido el país. En la Ilustración 25 se exponen estos datos, se tomó en cuenta una estación en la cuenca alta, dos en la cuenca media y una en la cuenca baja.



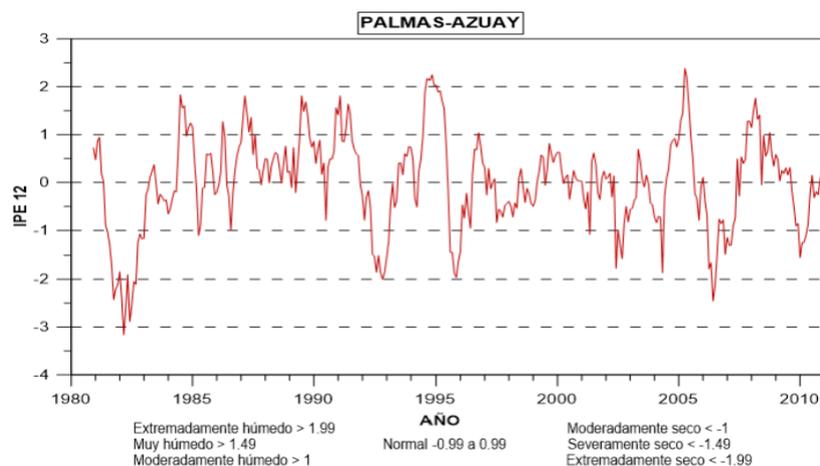


Ilustración 25. Gráfico de IPE histórico en algunas estaciones en la cuenca del río Paute.

Fuente: Valarezo (2017)

En la Tabla 9 se observan los periodos de retornos de las sequías que han ocurrido en los 31 años de recolección de datos de las estaciones.

Tabla 9. Periodo de retornos de sequías en la cuenca del río Paute. Fuente: Valarezo (2017)

Estaciones	Intensidad	Número de meses en 31 años	Periodo de retorno
Piscícola Chirimichay (A)	-1.00 a -1.49	40	1 mes en 1 año
	-1.50 a -1.99	1	1 mes en 31 años
	<-2.00	0	Ninguna en 31 años
Cuenca- Aeropuerto (M)	-1.00 a -1.49	29	1 mes en 1 año
	-1.50 a -1.99	13	1 mes en 2 años
	<-2.00	10	1 mes en 3 años
Palmas Azuay (B)	-1.00 a -1.49	23	1 mes en 1 año
	-1.50 a -1.99	18	1 mes en 2 años
	<-2.00	13	1 mes en 2 años

A partir de los datos recolectados se pudo inferir que hay mucha más ocurrencia de sequías moderadas (-1.00 a -1.49), las sequías severas (-1.50 a -1.99) y las sequías extremas (<-2.00). Asimismo, se determinó que las sequías moderadas tienen un periodo de retorno de al menos 1 mes cada año en la cuenca. La mayor frecuencia de sequías se ubica en la cuenca baja. Además, se confirmaron las

sequías meteorológicas de algunas zonas de la cuenca en distintos tiempos, es decir, las sequías ocurren en varias partes de la cuenca en tiempos distintos y a diferente intensidad. Como se sabe, en 1985 ocurrió una gran sequía, la cual abarcó la cuenca entera; sin embargo, no se descarta que vuelva a suceder en el futuro.

Esto pone en alerta a las estructuras dependientes de agua en la cuenca del Paute, especialmente la cuenca baja, puesto que si se sigue la tendencia, no sería raro esperar más sequías.

Sequías: amenazas futuras

Para describir las amenazas futuras se tuvieron en cuenta los resultados del estudio realizado por Araneda (2017), quien modeló la cuenca con el software HEC-HMS, y que también tomó datos como precipitaciones, evapotranspiración, caudales y temperatura según futuros escenarios presentados por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPPC), como se muestra a continuación en la Ilustración 26.

Escenario	Requerimiento y consideraciones
RCP 2.6	<ul style="list-style-type: none"> * Tecnologías de almacenamiento y captura de carbono ("Carbón Capture and Storage", CCS) * Disminución de emisiones de bio-energías, gas natural, petróleo y carbono a partir del año 2020
RCP 4.5	<ul style="list-style-type: none"> * Supone políticas climáticas que incluyen la penalización del uso de carbono * La población mundial en 2065 llega a 9 mil millones y se reduce a 8.7 mil millones en 2100 * Crecimiento de la necesidad energética en 3 órdenes de magnitud * Imponer precios al carbón, tecnología de captura y almacenamiento de carbón (CCS), desarrollo de la industria
RCP 6	<ul style="list-style-type: none"> * Imposición de políticas climáticas, es decir, que limiten las emisiones vía precios y tecnología de CCS * La población mundial crece hasta 9.8 billones al año 2100 * El PIB per cápita global crece un 1.6% anualmente durante 2000 - 2060 y entre 1.3 y 1.4% durante 2060 - 2100 * La intensidad energética disminuye a un ritmo de 1.2%/año antes de 2060 a un ritmo de 1.5%/año entre 2060 -
RCP 8.5	<ul style="list-style-type: none"> * Alto crecimiento poblacional * Crecimiento relativamente bajo del PIB * Tasas modestas de cambios tecnológicos y de eficiencia * Importante demanda energética * No se implementan políticas de cambio climático

Ilustración 26. Características de escenarios futuros presentes en el informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [IPPC]. Fuente: Van Vuuren et al. (2011). Obtenido: Araneda (2017)

Las sequías futuras se identificaron en el modelo mediante el IPE. También se empleó el Índice de déficit de humedad del suelo (SWDI), índice de aridez (IA), índice normalizado de los caudales fluviales (SSFI) y el índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración (SPEI). Finalmente, luego de ingresar los datos necesarios para la caracterización y según los escenarios futuros del IPCC, se obtuvieron los siguientes resultados (ver Ilustración 27):

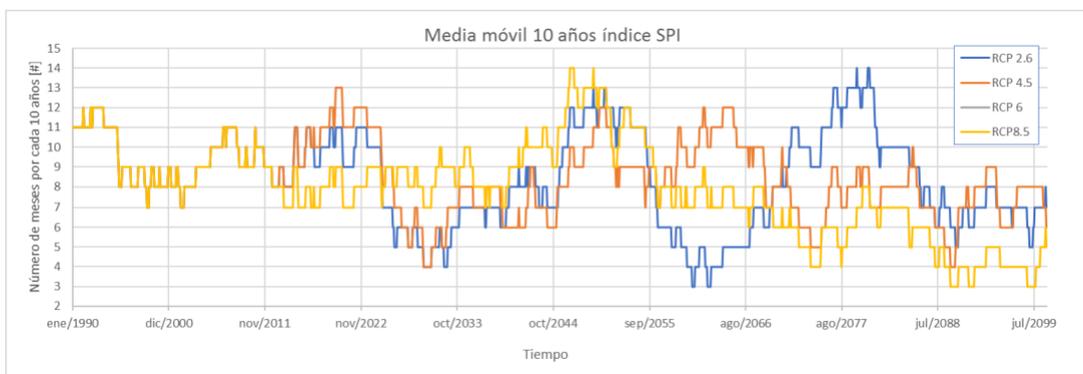


Ilustración 27. Media del SPI en lapsos de 10 años. Fuente: Araneda (2017)

También se empleó el índice genérico, el cual suma los valores de los siguientes índices: SPEI, SSFI y SWDI.

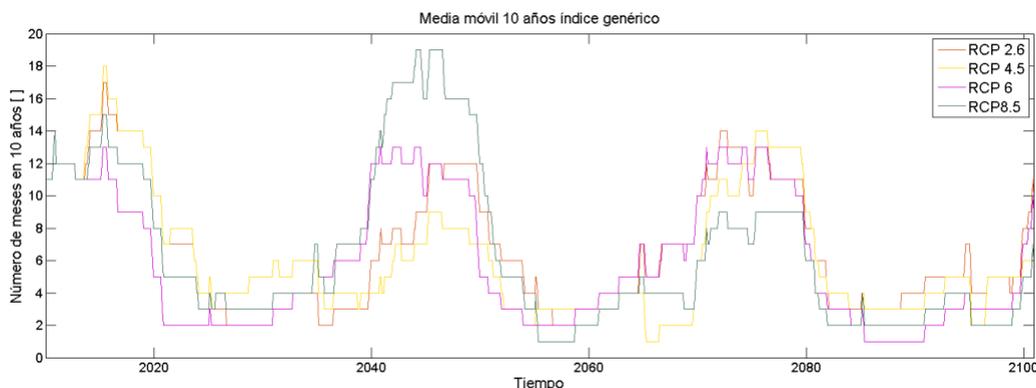


Ilustración 28. Media de índice genérico en lapsos de 10 años. Fuente: Araneda (2017)

Al concluir su estudio, Araneda (2017) señaló que la escasez de agua en la cuenca del río Paute aumentará en el futuro, junto a la concurrencia de las temporadas de estiajes. Estos eventos sucederán con mayor intensidad en zonas donde exista mayor concentración poblacional. Además, expresó que, si bien existen temporadas en las que la cuenca genera una cantidad de agua menor a la habitual, éstas se agravan debido a la gestión del recurso y cambios climatológicos antropogénicos. Finalmente, la autora mencionó que la

probabilidad de las sequías agrícolas y la mala gestión del recurso cada vez son mayores, y se prevé que siga aumentando en el futuro.

Procesos de erosión

La erosión es otro de los procesos que inducen a la desertificación, además de ser un indicativo de este proceso. La erosión se ve influenciada por las sequías, el uso de suelo, entre otros. Al igual que en otras provincias, en la provincia de Azuay se llevan a cabo procesos erosivos, cada uno con un grado de afectación diferente. Además, por estar en la región Sierra del país, la erosión está muy influida por la pendiente, producto de las cordilleras y el uso de suelo, debido a que en esas zonas existe una cantidad importante de tierras dedicada a la agricultura y el pastoreo.

Para el análisis de los riesgos de erosión se examinaron los resultados del trabajo realizado por Corral y Reyes (2020), cuya metodología se basó en la Ecuación Universal Revisada de la Pérdida de Suelo (USLE) y se tuvieron en cuenta algunas variables como las precipitaciones, los tipos de bosques, los procesos erosivos, la cobertura vegetal, la amenaza de incendios y las pendientes (ver Ilustración 29).

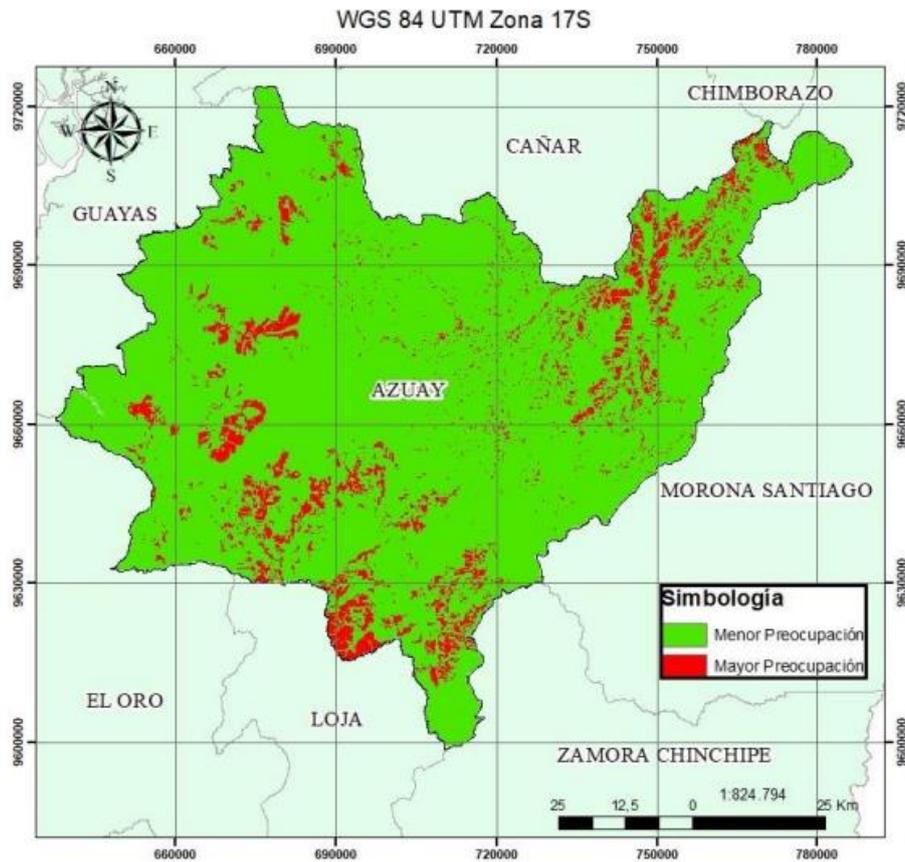


Ilustración 29. Mapa de zonas en procesos de erosión con riesgo de incendios. Fuente: Corral y Reyes (2020)

En la Ilustración 29 se observan las zonas en proceso de erosión con riesgo de incendios forestales. Asimismo, se evidencia que algunas zonas dispersas en la cuenca baja y cuenca alta están catalogadas con un riesgo alto ante incendios.

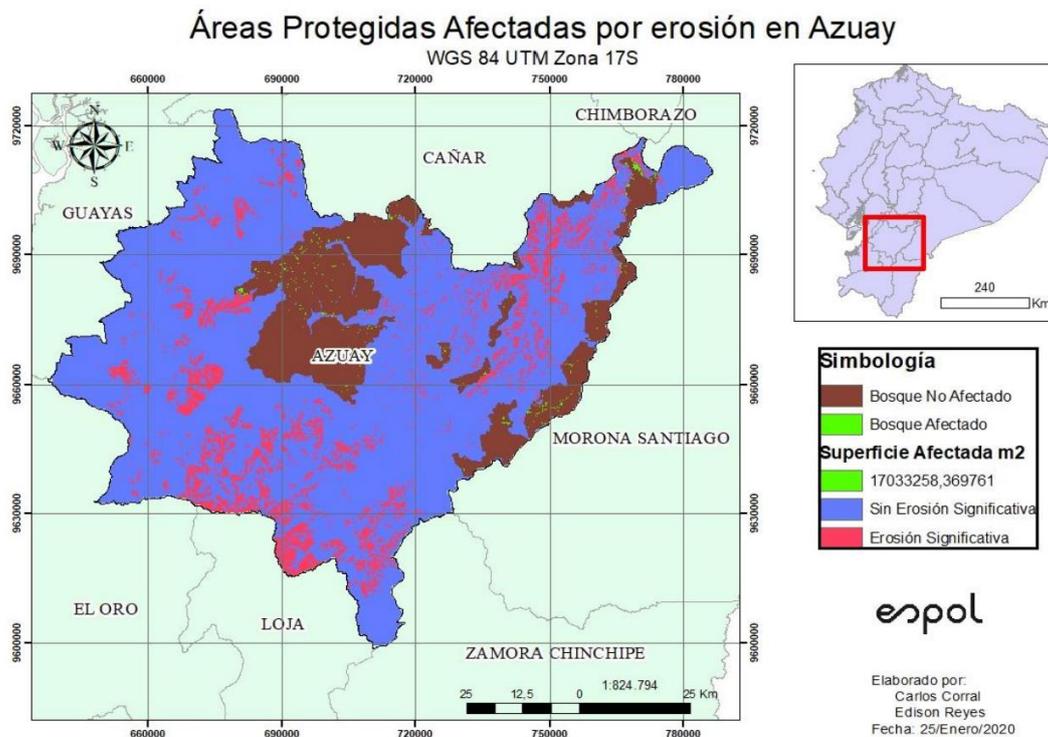


Ilustración 30. Mapa de zonas con procesos de erosión. Fuente: Corral y Reyes (2020)

Finalmente, como se muestra en la Ilustración 30, luego de relacionar todas las variables mencionadas previamente, se obtuvo el mapa con las zonas que presentan erosión significativa y las que no. De esa manera, se constató que existen muchas zonas erosionadas dispersas en la cuenca baja del río Paute, aunque en menor medida, en comparación con la cuenca alta. Sin embargo, el hecho de que existan zonas erosionadas dispersas no significa que no sea de importancia, dado que, una vez iniciado el proceso de erosión, es muy probable que este se siga extendiendo debido a los efectos de la erosión (Corral y Reyes, 2020).

Deforestación en la provincia de Azuay

La deforestación es otro de los procesos que agravan los procesos de desertificación y tiene una relación cercana con los demás procesos, puesto que se complementan unos a los otros. En la provincia de Azuay es un problema común, al igual que en otras provincias de Ecuador. Esta provincia cuenta con la presencia del sector maderero y con una gran amenaza de incendios forestales, estos lideran los principales factores causantes de deforestación.

Según el Ministerio del Ambiente (2017), durante el periodo 2014-2016, en la provincia de Azuay se registró una deforestación bruta promedio de 2.411 hectáreas/año, lo que representa una cantidad relevante en comparación con otras provincias en el mismo lapso. Ahora bien, no todo es deforestación en Azuay, pues también existen programas de reforestación impulsados por la alcaldía de la provincia en busca de la regeneración natural de los bosques. Por otra parte, también se evidenció una deforestación neta, lo que incluye a la ecuación la regeneración promedio anual, tal como se muestra en las tablas 10, 11 y 12.

Tabla 10. Deforestación bruta anual promedio en Azuay. Fuente: Ministerio del Ambiente, 2017

Provincia	Deforestación bruta anual promedio (ha/año)			
	1990-2000	2000-2008	2008-2014	2014-2016
Azuay	4.008	1.147	2.740	2.411

Tabla 11. Regeneración anual promedio en Azuay. Fuente: Ministerio del Ambiente, 2017

Provincia	Regeneración anual promedio (ha/año)			
	1990-2000	2000-2008	2008-2014	2014-2016
Azuay	1.684	455	1.701	587

Tabla 12. Deforestación neta anual promedio en Azuay. Fuente: Ministerio del Ambiente, 2017

Provincia	Deforestación neta anual promedio (ha/año)			
	1990-2000	2000-2008	2008-2014	2014-2016
Azuay	2.325	692	1.039	1.824

Los datos del Ministerio del Ambiente (2017) permitieron inferir que la deforestación neta tiene la tendencia a aumentar desde el año 2000, debido a la baja de regeneración y la constante deforestación bruta que sufre la provincia de Azuay.

A continuación, se detalla la deforestación causada por los incendios forestales. Durante el periodo 2014-2018 ocurrieron 1129 incendios forestales en la

provincia de Azuay, además de añadir que el periodo 2016-2018 fue el que registró mayor cantidad de incendios (Garzón y Campoverde, 2020).

En su investigación, Garzón y Campoverde (2020) recopilaron información sobre los incendios forestales en la provincia de Azuay durante el periodo 2014-2018, como producto final de su investigación, realizaron un mapa de calor en el que se observan las zonas más afectadas (ver Ilustración 31).

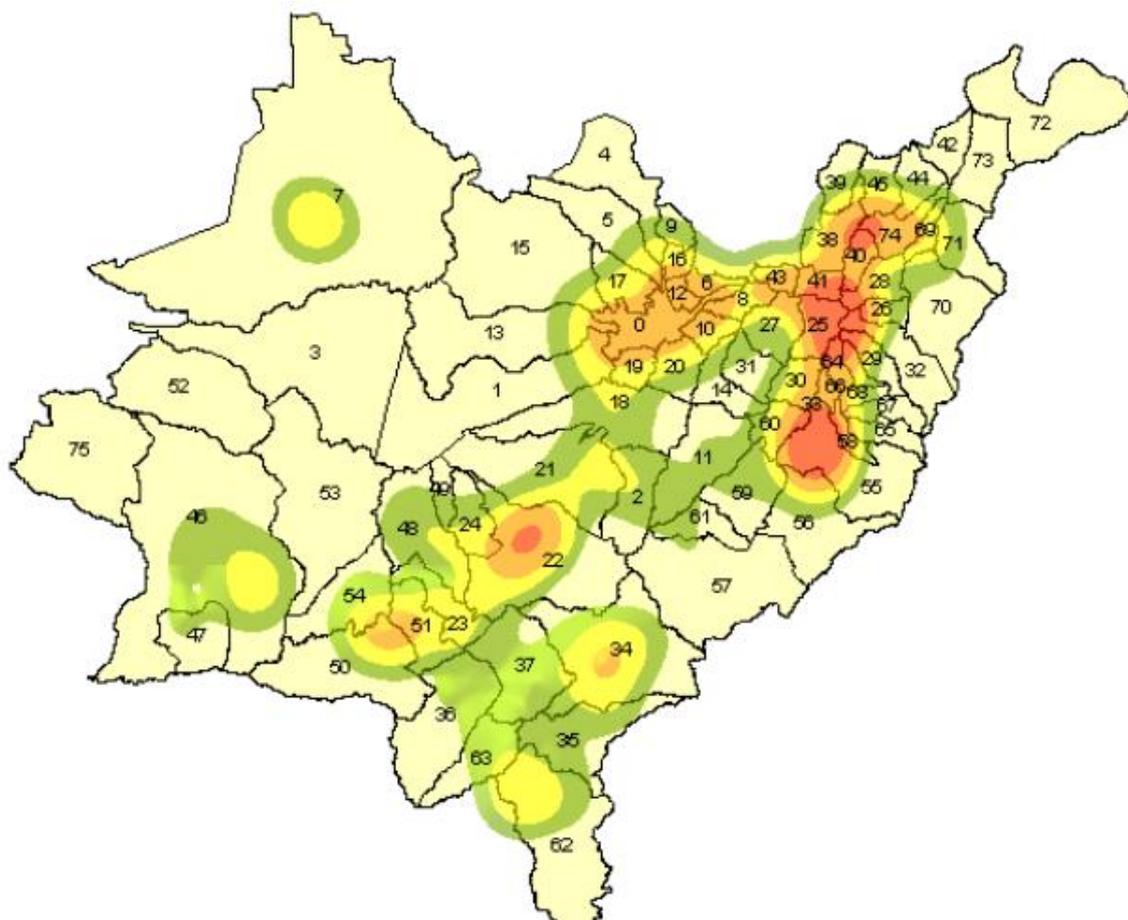


Ilustración 31. Mapa de calor por concentración de incendios forestales en la provincia de Azuay. Fuente: Garzón y Campoverde (2020)

Como se muestra en la Ilustración 31, en la provincia del Azuay se registró un total de 8639 hectáreas afectadas por incendios en el periodo 2014-2018. Lo anterior, siendo Molleturo la parroquia más afectada con un 23 % de su territorio afectado por incendios y Sigsig la menos afectada con un 3 % de su territorio afectado (Garzón y Campoverde, 2020). Cabe mencionar que en las zonas de mayor afectación se encuentra un cuerpo de agua que alimenta el río Paute, además del mismo río Paute, por lo que la deforestación en esta zona afectaría

directamente a los recursos hidrológicos de la cuenca baja del río y, por consiguiente, la infraestructura que depende de ella.

Impactos del cambio climático en la provincia de Azuay

Al igual que los anteriores procesos, el cambio climático se complementa con los demás procesos. Como se expuso, el cambio climático potencia la desertificación, ayudándose mutuamente, lo que agrava la situación. Los datos que se enuncian a continuación están enfocados en la cuenca del río Paute, debido a la gran importancia hidrológica para el país. El estudio realizado por Pozo (2018) da cuenta de la susceptibilidad de la cuenca del río Paute frente al cambio climático y hace énfasis en los cambios de temperaturas a futuro. En este estudio se tomó como referencia los cambios climáticos sugeridos por el IPCC, al igual que el estudio de Araneda (2017).

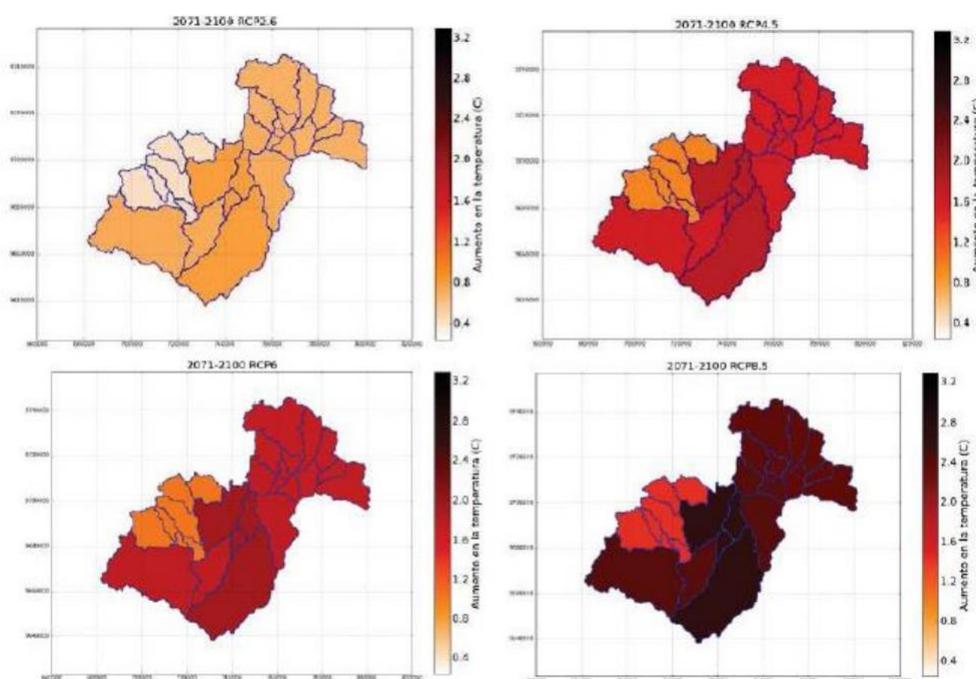


Ilustración 32. Variación de la temperatura anual media para los cuatro escenarios del IPCC.

Fuente: Pozo (2018)

Los datos expuestos en la Ilustración 32 se interpretan como un aumento de la temperatura de hasta 3.2 °C en el peor escenario desde el año 2071 a 2100. Por otro lado, Pozo (2018) hizo alusión al cambio climático que afronta la cuenca del río Paute, la cual ha llevado al aumento de la temperatura media a 0.28 °C por década. Esto se relaciona directamente con la evapotranspiración, el cual influye

en la capacidad de retención de humedad de los suelos, lo que ocasiona sequías (Sari, 2022).

Entre las consecuencias del cambio de temperatura se prevé el cambio de los caudales del río Paute. En su estudio, Pozo (2018) tomó algunas estaciones representativas dentro de la cuenca del río Paute. Sin embargo, aquí solo se tuvieron en cuenta los datos de dos estaciones que son muy importantes para el complejo hidroeléctrico Paute-Integral.

La primera estación se encuentra en la subcuenca que está en la presa Daniel Palacios, la que guarda el embalse de Amaluza; mientras que la segunda estación se halla en la presa y central Cardenillo. En las ilustraciones 33 y 34 se evidencia el comportamiento similar de ambas estaciones. Lo que se puede observar es que, en la temporada lluviosa, el caudal aumenta en los distintos escenarios; no obstante, en la temporada de estiaje, el caudal que circula no aumenta de manera notoria, pues incluso se mantiene durante meses.

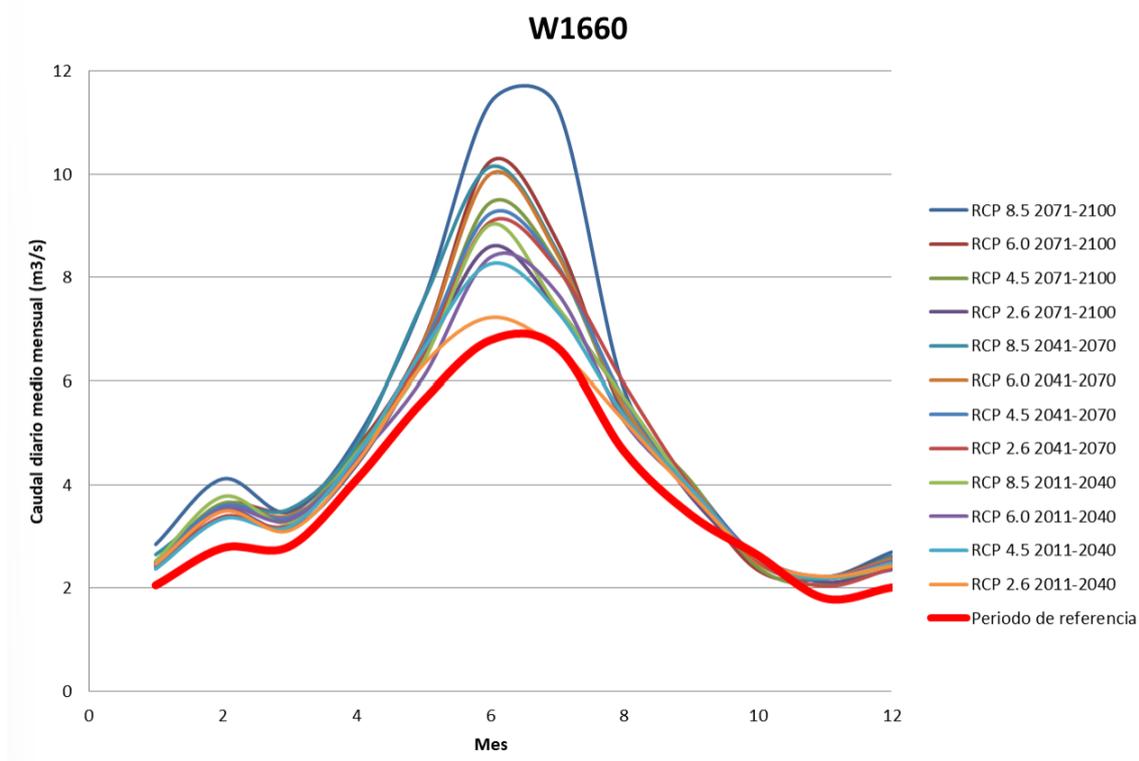


Ilustración 33. Valores de caudal medio mensual de estación W1660 (presa Daniel Palacios) en los distintos escenarios IPCC. Fuente: Pozo (2018)

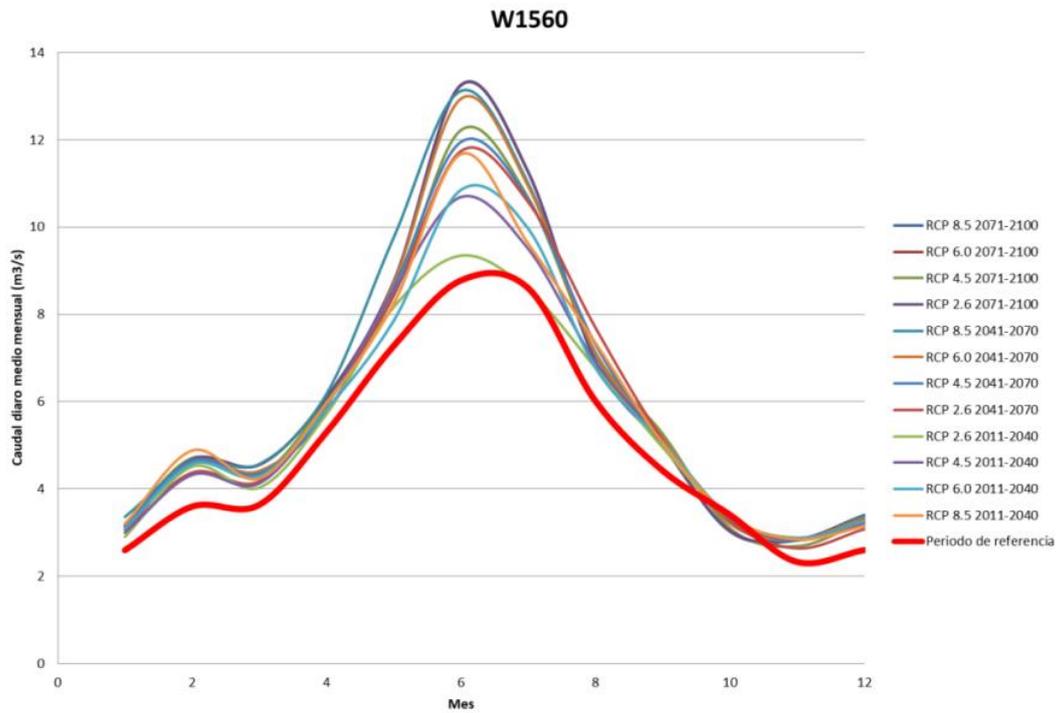


Ilustración 34. Valores de caudal medio mensual de estación W1560 (presa Cardenillo) en los distintos escenarios IPPC. Fuente: Pozo (2018)

CAPÍTULO 2: PERFIL ENERGÉTICO DE ECUADOR

2.1 Fuentes de energía en Ecuador

A lo largo del tiempo, Ecuador ha ido evolucionando en temas de obtención de energía. De esa manera, el país ha logrado avanzar en los últimos 20 años y, con ello, la demanda energética. El Ministerio de Energía y Recursos Naturales no Renovables, actual Ministerio de Energía y Minas, en su plan maestro de electricidad prevé que se siga la tendencia a crecimiento que ha tenido los últimos 20 años.

El aumento de la demanda energética del país, además de otros factores como las consecuencias del cambio climático, ha llevado a que se estudien muchas opciones de obtención energía, una la más importante, la obtención de energía con recursos renovables. Los recursos renovables son aquellos que se regeneran naturalmente, se obtienen a través de flujos energéticos y pueden aprovecharse industrialmente aplicando tecnología (Gary y Boyle, 2004, como se citó en Hernáez, 2015). Ecuador cuenta con muchos recursos naturales, gracias a su topografía y gran diversidad climática. Esta es la razón por la que tiene un gran potencial de obtención de energía mediante recursos renovables (Arciniega et al., 2018).

El uso de los recursos renovables en generación de energía representa una de las mejores herramientas para mitigar el cambio climático. Según Sathaye et al. (2011, como se citó en Castro, 2011), la media de la huella de carbón que dejan los recursos naturales se encuentra entre 4 y 46 gCO₂e/KWh (gramos de CO₂ por kilovatios/hora; mientras que la huella de carbón de los combustibles fósiles se ubica entre 469 y 1001 gCO₂e/kWh.

Hace 20 años, la producción de energía en Ecuador era muy diferente a la actual. La producción de energía generada por centrales termoeléctricas abarcaba el 25 % de la producción energética nacional. Esto causaba un gran impacto ambiental, dado que se empleaban combustibles fósiles en la producción de este tipo de energía (CENACE, 2020). Desde el 2017, según el CENACE (2020), la producción de energía con recursos no renovables, tal como la energía termoeléctrica, disminuyó considerablemente. Sin embargo, se ha seguido

empleado para satisfacer la demanda energética de Ecuador desde los inicios de la historia energética del país, especialmente en temporadas de estiaje.

En los últimos años ha crecido la generación de energía mediante recursos renovables, puesto que Ecuador se ha enfocado en desarrollar este tipo de energía, con la energía hídrica encabezando este desarrollo. No obstante, el país está implementando otras fuentes energéticas renovables para complementar la energía hidráulica, tal como la solar y eólica (Hernández, 2015).

2.1.1 Energía hidráulica

La energía hidráulica es un tipo de energía renovable que aprovecha la energía cinética y potencial que genera el flujo del agua. El impacto ambiental que genera es muy bajo en comparación con la energía producida con combustibles fósiles (Arciniega, Artieda, Andrade y Yáñez, 2018). Para aprovechar este tipo de energía se construyen centrales hidroeléctricas. Existen algunos tipos de centrales como, por ejemplo, los de tipo reversibles. Cada central hidroeléctrica es única, debido a que su diseño se basa en el ambiente y su necesidad.

En Ecuador, la energía hidráulica es la principal fuente de energía, acaparando aproximadamente un 77 % de la producción nacional energética en el año 2020 (Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables, 2021). Esto convierte a Ecuador en un país sustentable en cuanto a generación de energía eléctrica. Actualmente, el país cuenta con aproximadamente 56 centrales hidroeléctricas de distintas capacidades (Arciniega et al., 2018).



Ilustración 35. Central hidroeléctrica Manduriacu. Quito-Cotacachi, Ecuador. Fuente: Corporación Eléctrica del Ecuador (CELEC)

En un gran porcentaje, el país es dependiente de la energía hidráulica, por lo que el agua es el recurso más importante en materia energética, constituyéndose en uno de recursos más valiosos que tiene el país. No obstante, el recurso más importante puede causar inconvenientes. Si bien el agua abunda y, en ocasiones, hay exceso del recurso; en algunas épocas se debe hacer frente a la escasez debido a las temporadas de estiaje.

Ecuador ha tratado de mitigar estos problemas construyendo embalses que regulen el caudal en épocas de estiaje. Sin embargo, debido al cambio climático natural y antropogénico que afecta al planeta, cuyas consecuencias se reflejan en todo el país, se prevé que las temporadas de estiaje sean más duraderas y severas en el futuro, por lo que se estima que las obras construidas para el almacenamiento de agua no sean suficientes para la cantidad que se necesite en épocas de estiaje.

2.1.2 Energía eólica

La energía eólica, al igual que la hidráulica, es fuente de energía renovable. Para aprovechar este tipo de energía se instala un molino de viento, el cual hace uso

de las corrientes de aire y las convierte en energía eléctrica. Lo usual es construir parques eólicos que puedan captar viento en lugares abiertos en la tierra o crear parques eólicos dentro del mar (Guastay y Llanes, 2020).

De manera significativa, en las últimas décadas se ha desarrollado tecnología que abarca este tipo de energía. Estos desarrollos permitieron mejores diseños, economizar materiales, reducir costos de operación y mantenimientos, y mejorar la vida útil del proyecto (Castro, 2011). En Ecuador, la energía eólica se incluyó en el Sistema Nacional Interconectado (SNI) a partir del año 2013. El parque eólico Minas de Huascachaca, ubicado en Loja, Azuay, será la cuarta incorporación y la más reciente de energía eólica que tendrá el país. Según la Corporación Eléctrica del Ecuador (CELEC), su funcionamiento se prevé para el presente año (2022).

En Ecuador, la energía eólica representa una muy pequeña parte de la producción energética del país, tan solo un 0.24 % de la producción nacional en el año 2020 se destinó a la producción de energía eólica. Por ello, este tipo de energía es considerada complementaria, debido a su pequeña aportación energética en comparación con las demás. Asimismo, se cree que este tipo de energía es desperdiciada por muchos expertos, una de las razones principales es que existen muchos puntos de alto interés para la energía eólica, esto gracias a la presencia de la cordillera de los Andes y la proximidad que tiene al océano Pacífico, lo que facilita las corrientes de aire (Aldeán, 2014). Entre las provincias con más potencial para la energía eólica se encuentran Loja y Azuay (Peláez y Espinoza, 2015).



Ilustración 36. Parque Eólico Villonaco. Loja, Ecuador. Fuente: Ministerio de Turismo

Al igual que la energía hidráulica, la energía eólica tiene un inconveniente, dado que los sistemas eólicos dependen de la velocidad del viento y sus variaciones diarias, mensuales y estacionales pueden variar drásticamente y ser aleatorias (Aldeán, 2014). Pese a ello, funcionan bien como complemento de la energía principal o como sistema autónomo para satisfacer pequeñas áreas (Calvo, 2015). Una gran utilidad, ya empleada en el mundo para este tipo de energía, es el sistema híbrido. A este sistema híbrido de energía se le suman otros tipos de generación de energía, tal como la energía solar mediante paneles fotovoltaicos.

2.1.3 Energía solar

La energía solar es un tipo de energía renovable, al igual que la energía hidráulica y eólica. Este tipo de energía tiene como fuente principal al sol. El sol participa de manera directa e indirecta en la generación de todas las energías de este planeta, entre ellas, la energía hidráulica y la eólica (Consejo Nacional de Electricidad [CONELEC], 2008).

Para generar la energía se basa en un fenómeno físico llamado “efecto voltaico”, que consiste en convertir la energía solar en energía eléctrica mediante semiconductores que llevan el nombre de células fotovoltaicas, de ahí el nombre de “energía fotovoltaica” (CONELEC, 2008). Estas celdas se ubican sobre paneles solares y, a través de la insolación que produce el sol, se genera energía.

En Ecuador, la energía solar se incluyó al SNI a partir del año 2013. Al año siguiente obtuvo una mejora en su producción y, de esa manera, se mantuvo constante en los años posteriores. En la actualidad, el mercado de la energía solar es muy pequeño, tanto que, en el mercado internacional, los costos de este tipo de tecnología han descendido aproximadamente en un 90 % desde el año 2000 y se prevé que siga disminuyendo. También se estima que en las próximas décadas la tecnología relacionada con este tipo de energía se desarrolle aún más rápido (Roca, 2021).

En el informe anual de la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables (2021) se expuso que la energía solar fotovoltaica representó tan solo un 0.12 % de la producción energética a nivel nacional en el año 2020, por lo que es un porcentaje menor a la energía eólica, específicamente la mitad de la energía eólica. Esta información contrasta con la privilegiada ubicación geográfica en la zona ecuatorial en la que se encuentra el país, que se considera que alberga un gran potencial para la energía solar, debido a la alta radiación promedio (Aldeán, 2014).

Entre las provincias con más capacidad para generar este tipo de energía se encuentran: Loja, Chimborazo, Azuay, Guayas, Manabí, entre otras. La cantidad de energía que generaría dependería de la estación, dado que existen meses en los que la cantidad de insolación es mayor al promedio y otros meses en los que no ocurre; sin embargo, las provincias mencionadas previamente están por encima del promedio la mayoría de los meses (Corporación Eléctrica del Ecuador [CELEC], 2016).



Ilustración 37. Parque solar fotovoltaico Loja Energy. Loja, Ecuador. Fuente: Solartia

Al igual que los anteriores tipos de energías, este tipo de energía es dependiente del sol y la energía que llega a los paneles está ligada a las condiciones climáticas. Por tal motivo, para que los paneles solares trabajen correctamente, el día debe de estar despejado o, por lo menos, no debe existir tanta acumulación de nubes. Esta es la razón por la que, de manera exhaustiva, se estudian las condiciones climáticas típicas de la zona donde se ubican paneles, además de otros factores.

Para este tipo de energía, al ser dependiente de las condiciones climáticas, se busca que la energía sea un complemento para otro tipo de energía que, en el caso de Ecuador, es la hidráulica. Una solución es colocar paneles solares flotantes en los embalses, con el fin de que los paneles contribuyan en el funcionamiento de la hidroeléctricas. Como se indicó anteriormente, estos sistemas híbridos pueden contener otros tipos de generación de energía como lo es la energía eólica, de tal forma que se realice un trabajo en conjunto.

2.1.4 Energía en centrales termoeléctricas

La generación de energía por medio de las centrales termoeléctricas, a diferencia de las anteriores, da como resultado energía no renovable. Es considerada así, debido a que la fuente principal, en su mayoría, son los combustibles fósiles. La energía eléctrica se obtiene a través de procesos de combustión de los

combustibles fósiles, los cuales ayudan a crear vapor y esto, a su vez, impulsa la producción de energía eléctrica por medio de los generadores. Algunos de estos combustibles fósiles empleados en las centrales termoeléctricas son: diésel, *fuel oil*, gas natural, nafta, entre otros (Morales y Valladarez, 2012).

Las centrales termoeléctricas han acompañado a Ecuador durante el mismo tiempo que las centrales hidroeléctricas. Décadas atrás, la generación de energía solo se centraba en las centrales termoeléctricas y las centrales hidroeléctricas, estas últimas, encargadas de suministrar a todo el país. Actualmente, la generación de energía se ha diversificado, producto de muchos factores, entre ellos y uno muy importante, el cambio climático.

El punto negativo más relevante de la generación de energía mediante combustibles fósiles es el impacto ambiental que este genera mediante la liberación de muchos contaminantes durante el proceso de combustión. Algunos de estos contaminantes son: monóxido de carbono, dióxido de carbono, óxido de nitrógeno, óxido de azufre, partículas suspendidas, hidrocarburos no combustionados, entre otros (Morales y Valladarez, 2012).

La evidencia científica sobre las consecuencias que trae consigo la quema de este tipo de combustible ha influido en la generación de energía, tanto que, en Ecuador, la cantidad producida por este tipo ha decaído notoriamente desde el año 2017, y en los años más recientes, específicamente el año 2020, ha llegado a representar un 20 % de la producción nacional de energía (Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables, 2021). Este dato demuestra la conversión de la matriz energética ecuatoriana, tanto que, en años anteriores, la producción energética de centrales termoeléctricas llegaba hasta el 50 % de la producción nacional (CENACE, 2020).



Ilustración 38. Central Térmica Esmeralda II. Esmeralda, Ecuador. Fuente: CELEC

En tiempo actuales, las centrales termoeléctricas se utilizan para obtener energía eléctrica en menor medida. Aun así, es la segunda fuente de energía eléctrica a nivel nacional, seguido de la energía proveída de las centrales hidroeléctricas. En algunos casos, este tipo de generación de energía es tomada en cuenta como salida de emergencia, si las centrales hidroeléctricas sufren percances que no permitan funcionar correctamente.

Un ejemplo actual sería la erosión que sufre el río Coca y que afecta directamente a la central hidroeléctrica Coca Codo Sinclair. Según el CELEC, se cuenta con algunas centrales termoeléctricas en caso de que la erosión afecte el funcionamiento de la hidroeléctrica para suplir de energía eléctrica al país (Torres, 2021). Un segundo ejemplo sería el empleo de las centrales termoeléctricas en las temporadas de estiaje. Este aumento de generación de energía en las centrales termoeléctricas se encuentra detallado en el informe de la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables (2021).

2.1.5 Energía mediante interconexiones

Este método de obtención de energía se da a través de la importación de energía eléctrica de países vecinos. Como se expuso inicialmente, en el caso de Ecuador estos países son Colombia y Perú. Según el balance anual del CENACE (2020), la obtención de energía mediante interconexiones representó un 0.80 % de la producción nacional de energía eléctrica. Asimismo, catalogó a Colombia como mayor importador de energía, por encima de Perú. Es importante advertir que estas importaciones de energía se llevan a cabo especialmente en temporadas de estiaje que sufre el país, específicamente en los primeros meses del estiaje, esto es, entre los meses de septiembre a marzo.

Según los registros del CENACE, las importaciones con Colombia van desde el año 2003. No obstante, desde el año 2016, Ecuador empezó a exportar a Colombia. En los registros también se observa un balance realizado entre importación y exportación histórico entre los dos países. De acuerdo con los datos, Ecuador ha importado un 86 %, lo que equivale aproximadamente a 1120 millones de dólares; y, asimismo, ha exportado el 14 % restante, lo que se traduce en 183 millones aproximadamente. Esto permite inferir que Ecuador ha importado más de lo que ha exportado a Colombia.

En el caso de Perú, se tienen registro desde el año 2005 y, a diferencia de Colombia, registra un bajo nivel de importaciones a Ecuador. La última importación importante que se realizó del país vecino fue en 2010 y las que continuaron se hicieron en menor escala. A partir del 2016, Ecuador dejó de importar energía desde Perú y pasó completamente a exportar. Los meses en los que Ecuador exporta coinciden con los meses en los que Perú sufre la temporada de estiaje, a saber, desde mayo hasta el mes de septiembre. En esta temporada de estiaje en el país vecino, Ecuador goza de exceso de energía por los grandes caudales que cursan las hidroeléctricas; por lo tanto, este intercambio energético resulta beneficioso para ambas partes.

Estas interconexiones se promueven a través de acuerdos entre países como, por ejemplo, el de la Comunidad Andina (CAN), o antes llamado Pacto Andino. Por medio de estos acuerdos se pretende mejorar las relaciones entre países, impulsar su comercio y desarrollo, y al mismo tiempo buscar la integración de los países miembros. Entre los puntos importantes del acuerdo se encuentran las

transacciones eléctricas, lo cual fomenta los intercambios energéticos entre países miembros, las tarifas reguladas según la oferta y demanda, los intercambios según la disponibilidad excedente de cada país, las adecuaciones de factibilidad, entre otros aspectos (Comunidad Andina [CAN], 2019).

Recientemente, Ecuador asumió la coordinación temporal del Sistema de Interconexión Eléctrica Andina (SINEA), como parte de los acuerdos de la CAN. Este proyecto plantea desarrollar algunos campos relacionados con la integración energética regional. Entre los países que conforman este proyecto se encuentran: Ecuador, Colombia, Perú, Chile y Bolivia (Ministerio de Energía y Minas, 2022). Este proyecto busca facilitar los intercambios y transacciones energéticas y desarrollar un corredor eléctrico andino. Sin duda, esto promovería las interconexiones entre países miembros, lo que se traduce en una oportunidad valiosa para que Ecuador pueda posicionarse como un gran oferente en energía eléctrica en la región.

2.2 Producción de centrales hidroeléctricas

La producción energética por parte de la energía hidráulica, producto de las centrales hidroeléctricas, acaparó el mayor porcentaje de producción en años recientes. Como se mencionó previamente, la producción de energía hidráulica representa un 77 % de la producción nacional, por lo que es muy importante para el país. Las centrales hidroeléctricas más relevantes del país se encuentran en la región Sierra, entre ellas, el complejo Paute-Integral y Coca Codo Sinclair; y, en el caso de la región Costa, la central hidroeléctrica Daule Peripa, la cual tiene uno de los embalses más importantes del país.

En la Ilustración 39 se muestra la producción energética mensual del año 2020, por parte de la energía hidráulica. De esa manera, se puede evidenciar la producción semirregular, debido a los ligeros descensos de producción en la temporada de estiaje del régimen oriental. Por otra parte, se observa el descenso drástico que tuvo en el mes de noviembre, lo que reflejó el aumento de energía termoeléctrica e importación energética en esos meses. En el mes de enero aumentó la producción como consecuencia del aumento de caudales en la vertiente occidental; sin embargo, la tendencia a bajar continuó hasta abril.

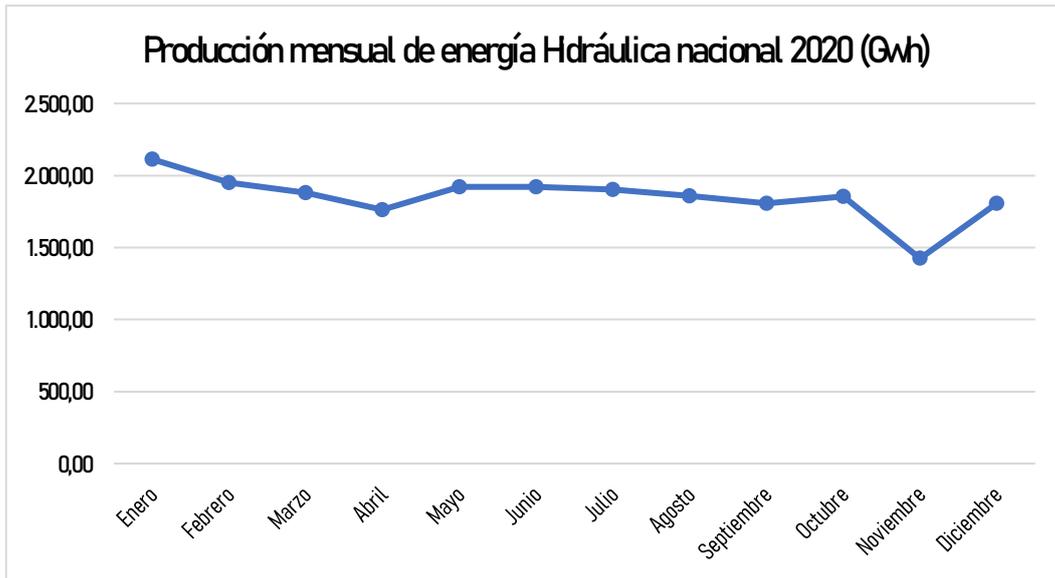


Ilustración 39. Producción mensual de energía hídrica nacional, 2020. Fuente: Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables, 2021

Los caudales de los ríos de la región Sierra, pertenecientes a la vertiente oriental, están controlados por las temporadas de estiaje del régimen del mismo nombre; en cambio, los ríos ubicados en la región costa, pertenecientes a la vertiente occidental, están controlados por las temporadas de estiaje del régimen occidental. A continuación, en la Ilustración 40 es posible identificar los caudales que llegan a los distintos embalses.

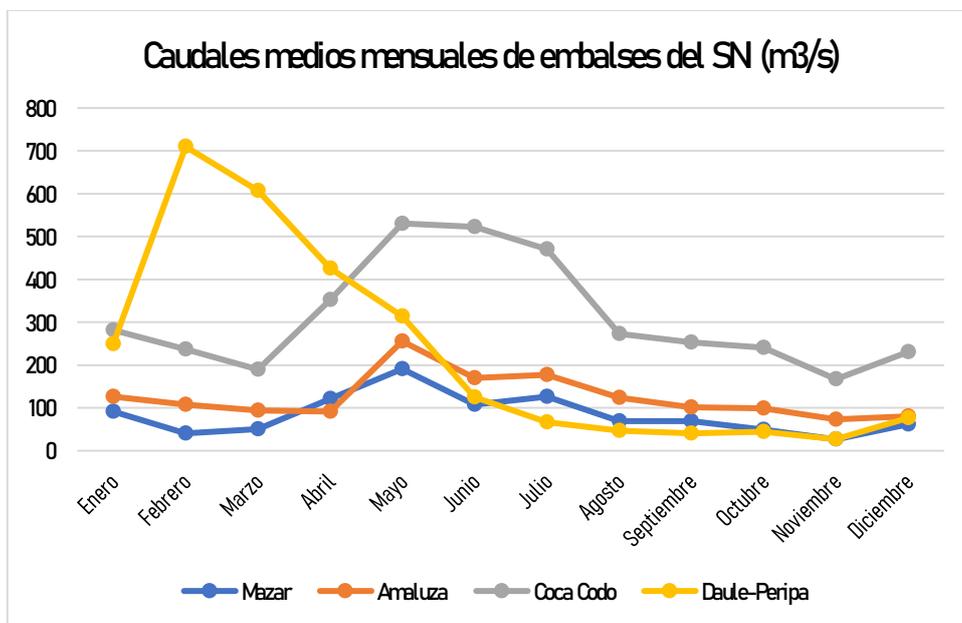


Ilustración 40. Caudales medios en embalses conectados al SNI en el año 2020. Fuente: Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables, 2021

Como resultado, en la Ilustración 40 se observa la baja de caudales hacia los principales embalses por parte de la región Sierra durante los meses comprendidos entre agosto y marzo. Pese a ser complementada por los caudales que llegan al embalse en la región Costa, sigue existiendo un déficit de caudal en los meses de septiembre a diciembre, por lo que esas fechas son las usuales del aumento de producción de energía termoeléctrica e importaciones energéticas.

2.2.1 Producción de centrales hidroeléctricas en Azuay

Es bien sabido que el complejo hidroeléctrico Paute-Integral es uno de los proyectos más importantes del país, el cual se encuentra ubicado en los límites de la provincia de Azuay. Este proyecto hidroeléctrico consta de cuatro centrales hidroeléctricas, tres de ellas actualmente construidas: Paute-Molino, Paute-Mazar y Paute-Sopladora; y la última se encuentra en desarrollo: Paute-Cardenillo. Las tres centrales hidroeléctricas que funcionan actualmente tienen una potencia conjunta de 1757 MW, cabe resaltar que la central hidroeléctrica Paute-Molino es la que más energía aporta al complejo (ver Ilustración 41).

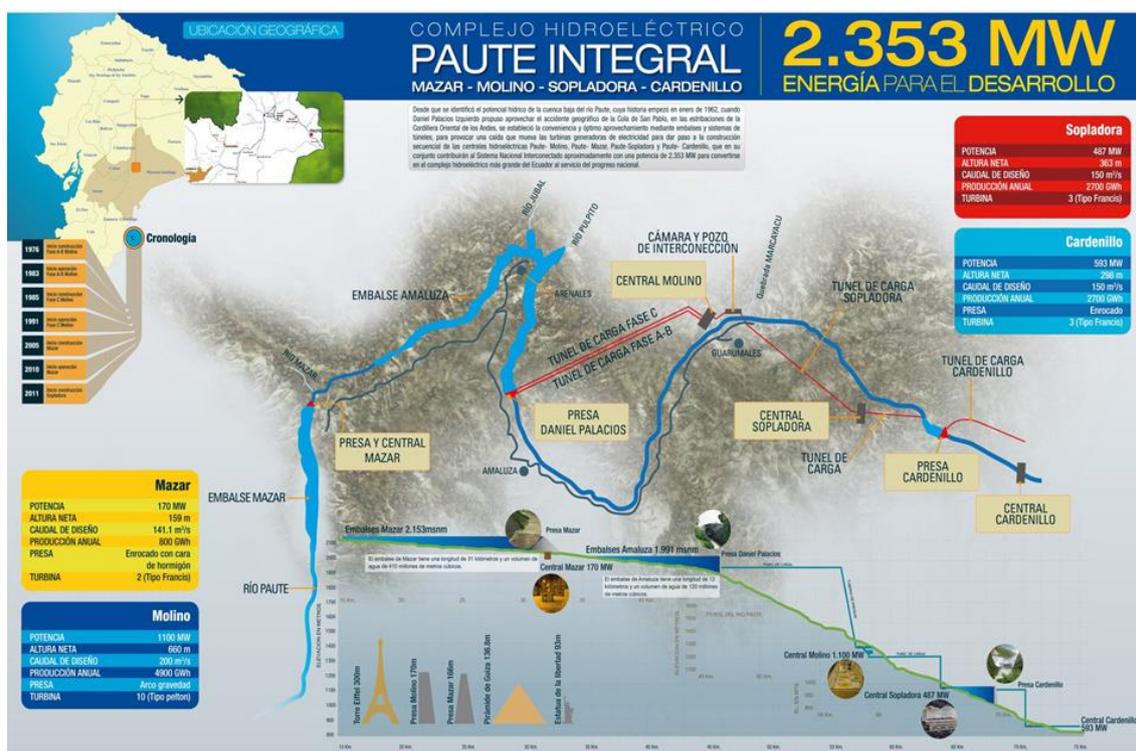


Ilustración 41. Esquema del complejo hidroeléctrico Paute-Integral. Fuente: CELEC

El complejo hidroeléctrico Paute-Integral es el segundo mayor generador de energía para el país, pese a estar incompleto. Este complejo está conformado por tres presas: Mazar, Daniel Palacios y Cardenillo, esta última en desarrollo. En este capítulo se detallan las distintas centrales hidroeléctricas que funcionan en el complejo actualmente con énfasis en su potencia, características, producción, entre otros aspectos.

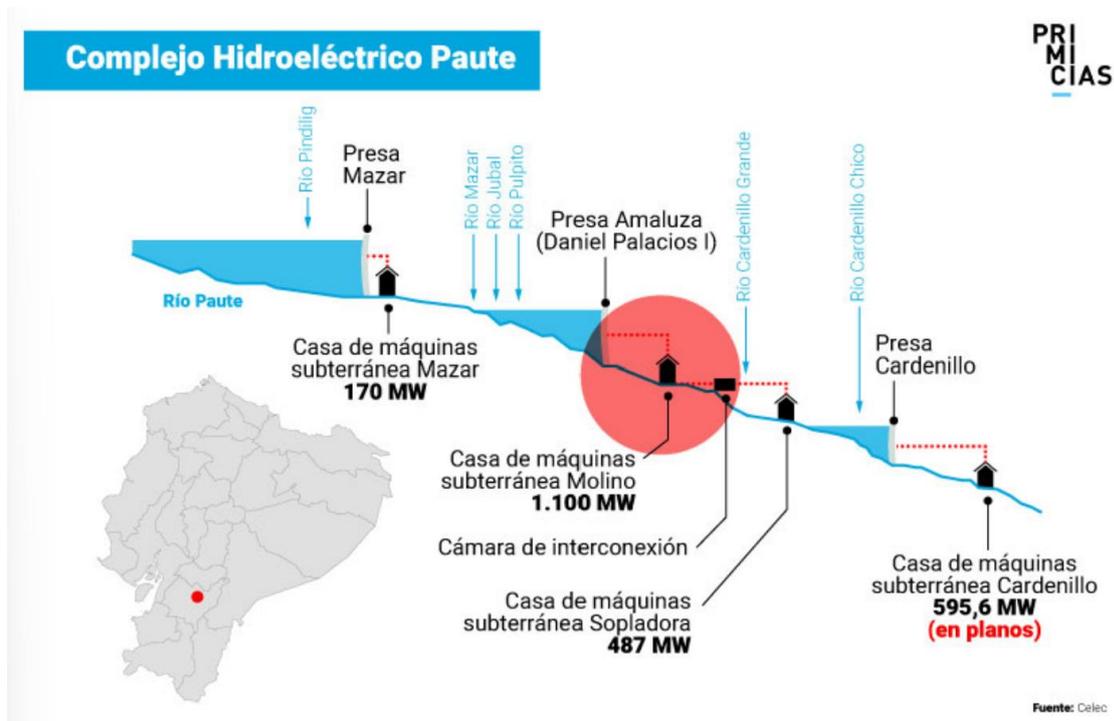


Ilustración 42. Esquemas del complejo hidroeléctrico Paute-Integral. Fuente: Primicias, 2022

Central Hidroeléctrica Paute-Mazar

La Central Hidroeléctrica Paute-Mazar está ubicada agua arriba del río Paute, antes del embalse Amaluza. Esta central cuenta con su propia presa, denominada con el mismo nombre. La presa Mazar está encargada de almacenar agua para el embalse Amaluza y de regular el caudal que llega al embalse Amaluza y, por consiguiente, a la central Paute-Molino; además almacenar agua para su propia generación energética. El embalse Mazar tiene una capacidad de almacenamiento de 410 millones de metros cúbicos (410 hm³) aproximadamente y un volumen útil de 309 millones de metros cúbicos (309 hm³). La central hidroeléctrica Mazar es la primera de la fila de centrales a lo largo del río Paute que conforma el complejo hidroeléctrico Paute-Integral y la segunda en orden de construcción, después de la central Molino.

Entre sus atributos más relevantes se encuentran las dos turbinas Francis, con una potencia máxima de 91.84 MW cada una; y dos generadores de capacidad de 80 MW, es decir, una capacidad de potencia total de 160 MW. El caudal de diseño es de 146 m³/s. Estas deben de operar con su caudal óptimo para maximizar el rendimiento, por lo que trabajan con una o dos unidades simultáneamente, esto según el caudal disponible en el momento (Veloz y Vizcaíno, 2011) (ver Ilustración 43).



Ilustración 43. Central Hidroeléctrica Paute-Mazar. Fuente: Quintero (2016)

Según la potencia de la central, en la Ilustración 44 se muestran las variaciones de los caudales que llegan a la presa Mazar en la escala mensual.

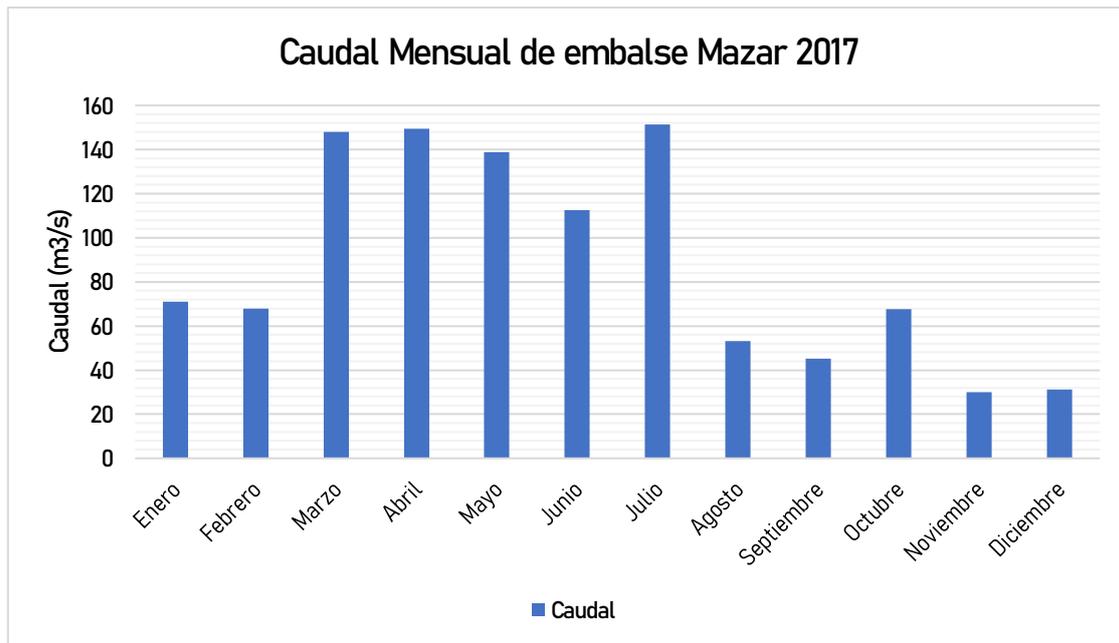


Ilustración 44. Caudal mensual del embalse Mazar, 2017. Fuente: CELEC Hidropaute (2017)

En la Ilustración 44 se observan los meses de estiaje y los meses de lluvias, junto a sus respectivos caudales. Los caudales se diferencian de gran manera, los grandes caudales en la temporada de lluvias, que van desde el mes de marzo a julio; mientras que, en la temporada de estiaje, se nota el bajo caudal que llega al embalse y los meses así van desde agosto hasta febrero. En temporadas de estiaje, la disminución del caudal es de aproximadamente el 50 %, en comparación a los caudales de las temporadas de lluvia.

En el informe anual de la CELEC Hidropaute también se expone la distribución del volumen de agua que llegó al embalse, tal como se evidencia a continuación (ver Ilustración 45).

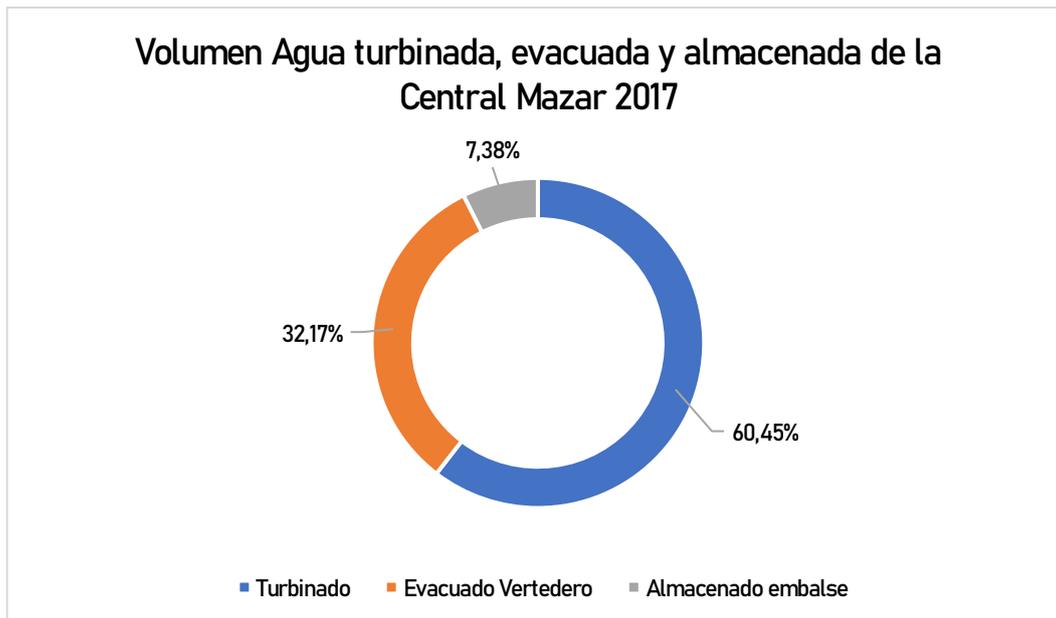


Ilustración 45. Distribución de volúmenes de agua en la central Paute-Mazar. Fuente: CELEC Hidropaute, 2017

Por otro lado, en el informe se menciona que el volumen total ingresado en el 2017 al embalse fue de 2 809.82 hm³, en los cuales ingresaron el 38.98 % en el periodo seco o estiaje; mientras que el 61.02 % ingresó en las temporadas de lluvias. Al volumen ingresado se debe sumar el volumen remanente del año pasado, el cual fue de 196.5 hm³. Con la suma de los dos se determina que el volumen total del embalse en el año 2017 fue de 3006.33 hm³. Dicho este valor, se muestra la distribución volumen almacenada en el embalse. Esta muestra que el 60.45 % del porcentaje total de volumen de agua que llegó a la central fue turbinado, lo que equivale a 1817.20 hm³; mientras que el 32.17 % fue desalojado por lo vertederos, lo que equivale a 967.22 hm³. En últimas, el embalse quedó con un volumen de 221.91 hm³ de los 394 hm³ de volumen total de almacenamiento. Esto se traduce en 7.38 % del volumen total del año 2017.

La generación energética neta que aportó la central Paute-Mazar al SNI mensual se puede observar en la Ilustración 46, el cual demuestra que el mes de mayo fue el que más generó. Además de seguir la misma tendencia de los caudales (ver Ilustración 44), demuestra la generación de energía en temporadas lluviosas y en temporadas de estiaje. Los datos reflejan la disminución de generación eléctrica en los meses de estiaje, aproximadamente en un 45 % en contraste con los meses de la temporada de lluvias.

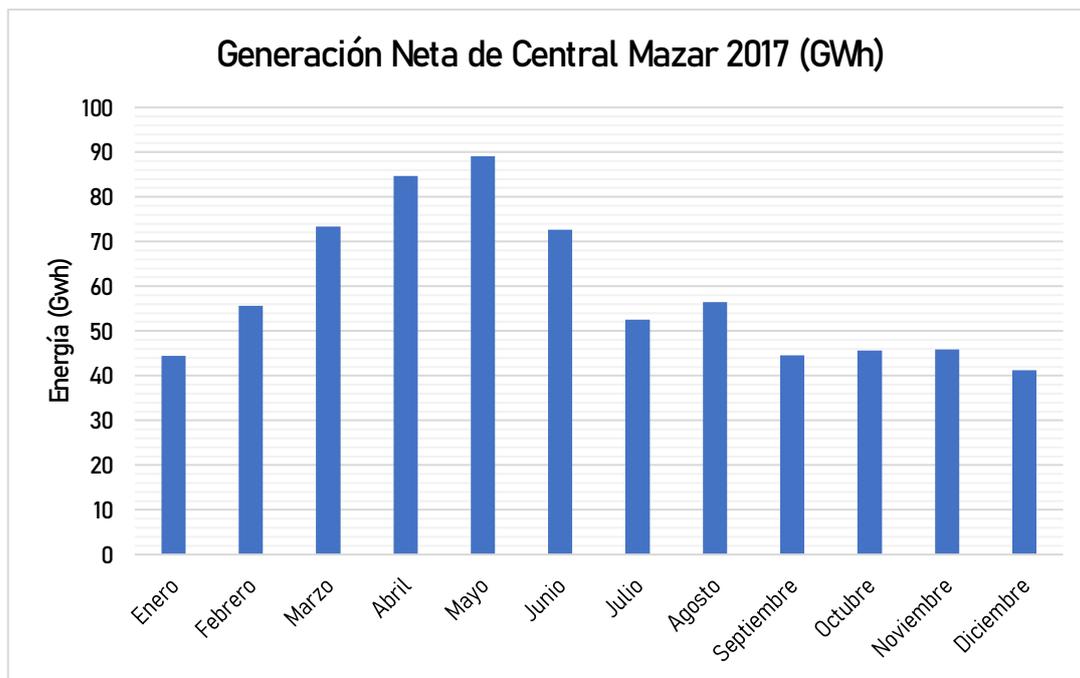


Ilustración 46. Generación de energía neta de la central Paute-Mazar. Fuente: CELEC Hidropaute, 2017

Finalmente, en la Ilustración 47 se muestra la generación energética histórica de la central Paute-Mazar. En este caso, se evidencian las variaciones de generación, tal como la producción del año 2013, la cual es la más baja en comparación con otros años. Sin embargo, también tiene picos, así como la del año 2015. Esta ilustración muestra también la variabilidad de generación como consecuencia de la disminución de caudales, producto de sequías o mala gestión de recurso hídrico.

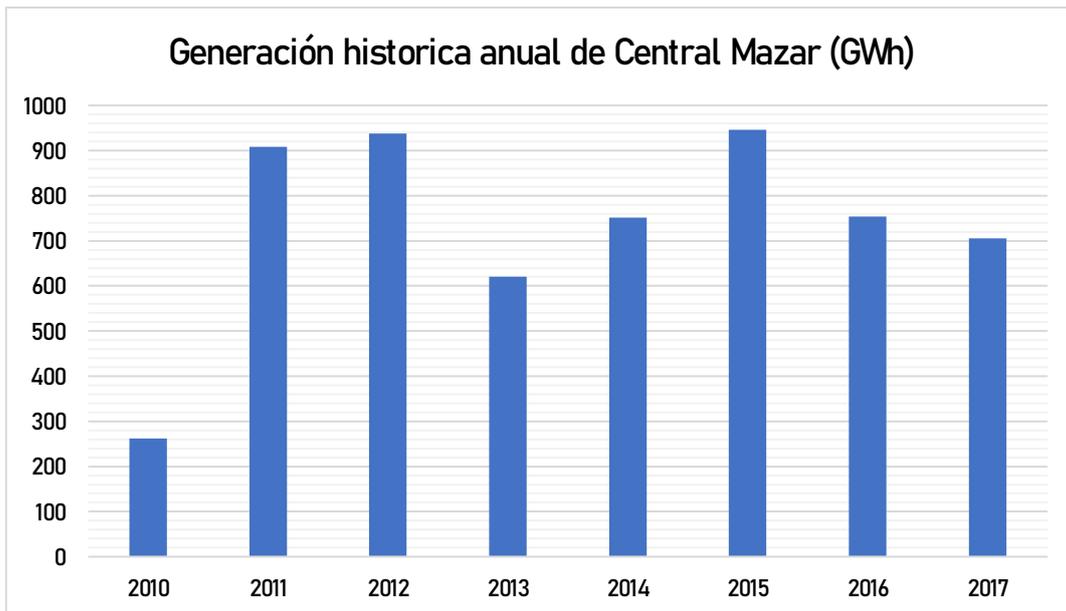


Ilustración 47. Generación energética histórica de la Central Paute-Mazar. Fuente: CELEC Hidropaute, 2017

Central Hidroeléctrica Paute-Molino

La Central Hidroeléctrica Paute-Molino es la más longeva e importante del complejo hidroeléctrico Paute-Integral. Esta parte del complejo la conforma la gran presa de arco gravedad Daniel Palacios, la cual contiene al embalse Amaluza. El embalse Amaluza tiene una capacidad de almacenamiento de 120 hm³, con un volumen útil de 100 hm³. El agua que llega al embalse Amaluza, en su mayoría, es el agua proveniente del embalse Mazar y del agua turbinada en la central Mazar; además de los cuerpos de agua cercanos (ver Ilustración 48).

La central hidroeléctrica, además de estar conformada por la presa, su embalse se encuentra conformado por el cuarto de máquinas. En ella se encuentran las 10 turbinas tipo Pelton, de las cuales cinco tienen 105 MW de capacidad cada una; mientras que las cinco restantes cuentan con 115 MW de capacidad cada una, como resultado se tiene una capacidad total de 1100 MW.



Ilustración 48. Central Hidroeléctrica Paute-Molino: Presa Daniel Palacios. Fuente: Primicias

En la Ilustración 49 se muestran las variaciones de los caudales que llegan a la presa Amaluza en la escala mensual.

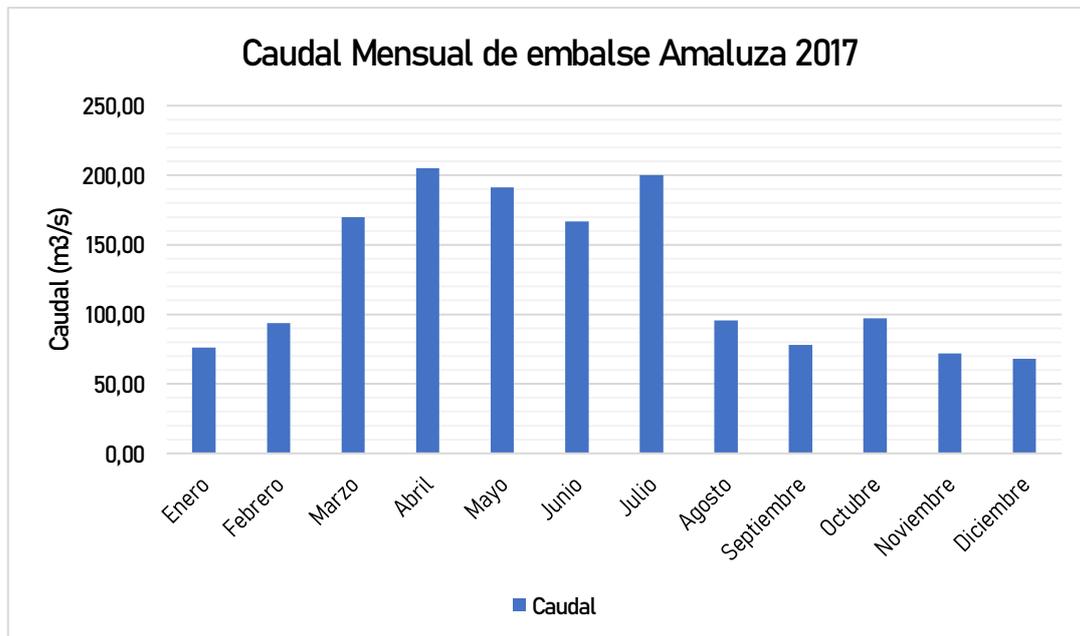


Ilustración 49. Caudal mensual del embalse Amaluza 2017. Fuente: CELEC Hidropaute, 2017

En la Ilustración 49 se observan los meses de estiaje y los meses de lluvias, junto a sus respectivos caudales. A su vez, se evidencia que las tendencias son similares debido a que la central Mazar se encuentra aguas arriba de la central Molino. En temas de caudales, el embalse Amaluza tiene mucha más capacidad

que el de Mazar, puesto que este embalse recibe agua del mismo embalse Mazar y de otros ríos que llegan al río Paute. Al igual que en Mazar, se puede observar marcada diferencia de las temporadas de estiaje y lluvia, lo que, en términos de porcentajes, quiere decir que la cantidad de agua que recibe al mes en el embalse Amaluza en temporada de estiaje es aproximadamente un 50 % del que recibe mensual en temporadas de lluvias.

En el informe de anual de CELEC Hidropaute también se muestra la distribución del volumen de agua que llegó al embalse, tal como se expone a continuación (ver Ilustración 50).

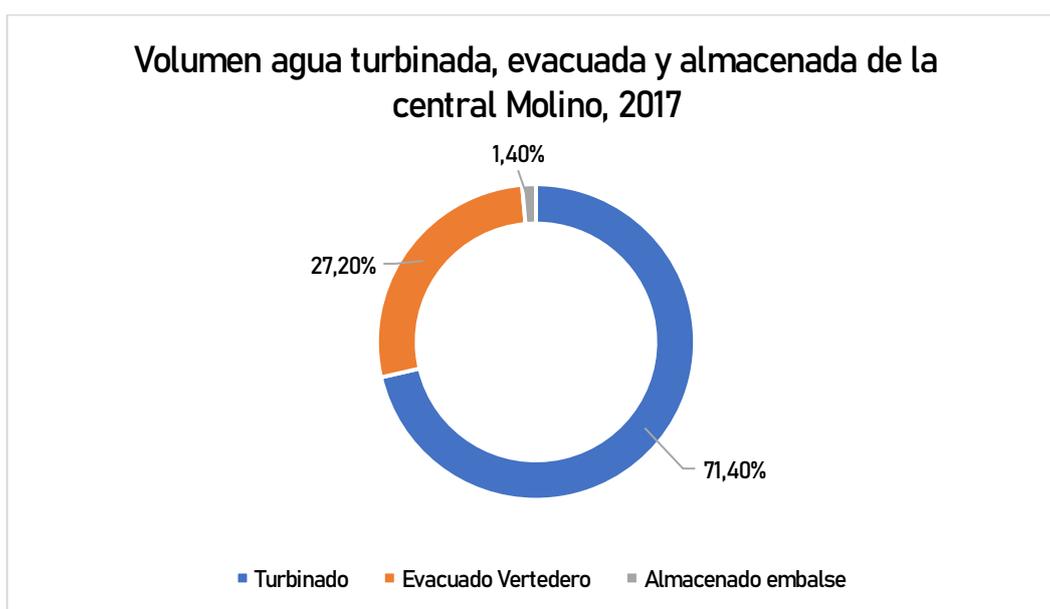


Ilustración 50. Distribución de volúmenes de agua en la central Paute-Molino. Fuente: CELEC Hidropaute, 2017

En el informe se expone que el volumen total ingresado al embalse en el 2017 fue de 3970.93 hm³, con un volumen de 45.37 hm³ al inicio de año; es decir, el embalse Amaluza almacenó un volumen total de 4016.30 hm³ en todo el año 2017. Según la distribución, del total de volumen almacenado, el 27.20 % se evacuó por lo vertederos y por el desagüe de fondo, lo que equivale a 1092.28 hm³; mientras que el porcentaje de agua empleada para generación eléctrica fue del 71.40 %, lo que equivale a 2867.49 hm³. Finalmente, el volumen que obtuvo el embalse a fin de año fue de 56.91 hm³, lo que se traduce en 1.40 % del volumen total del año.

La generación energética neta que aportó la central Paute-Molino al SNI mensual se puede observar en la Ilustración 51. Es posible apreciar la diferencia que tiene con la central Mazar, dado que la central Molino tiene una generación mucho más regular, debido a que la central Mazar ayuda a que el embalse Amaluza se encuentre con suficiente agua para que la generación de la central sea lo más regular posible. Sin embargo, se puede visualizar la disminución de generación eléctrica en los meses de estiaje, con un porcentaje de disminución en generación eléctrica de aproximadamente de 25 % en los meses de noviembre a enero, además del mes de septiembre.

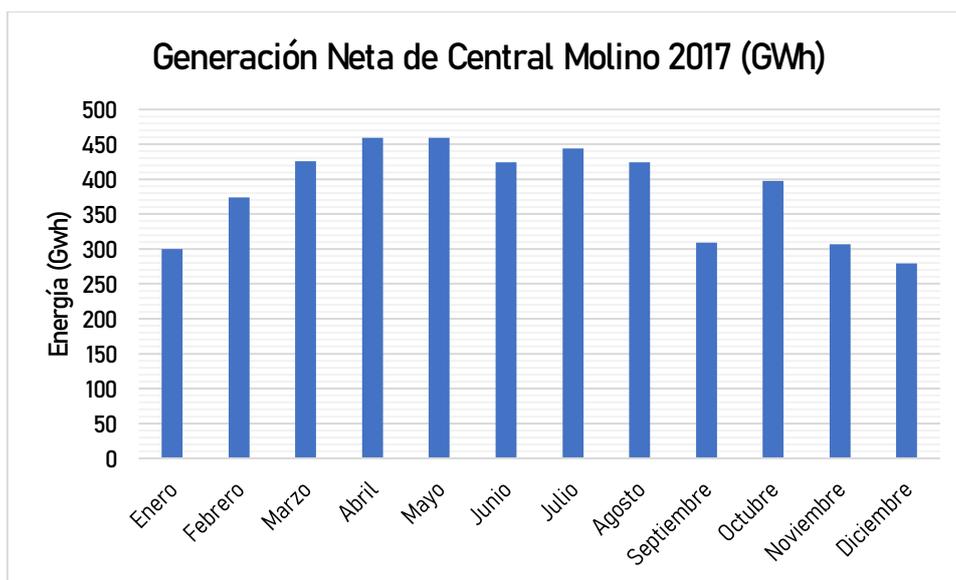


Ilustración 51. Generación de energía neta de la central Paute-Molino. Fuente: CELEC Hidropaute, 2017

Para finalizar, en la Ilustración 52 se muestra la generación energética histórica de la central Paute-Molino. En este caso, se puede evidenciar que la generación del 2017 fue baja en contraste con los años anteriores y con los picos de generación del año 2015. Estos datos dan cuenta de la variabilidad de generación ocasionada por el bajo caudal que corre por el río Paute, lo cual puede obedecer a muchos factores como, por ejemplo, la mala gestión del recurso hídrico y las sequías.

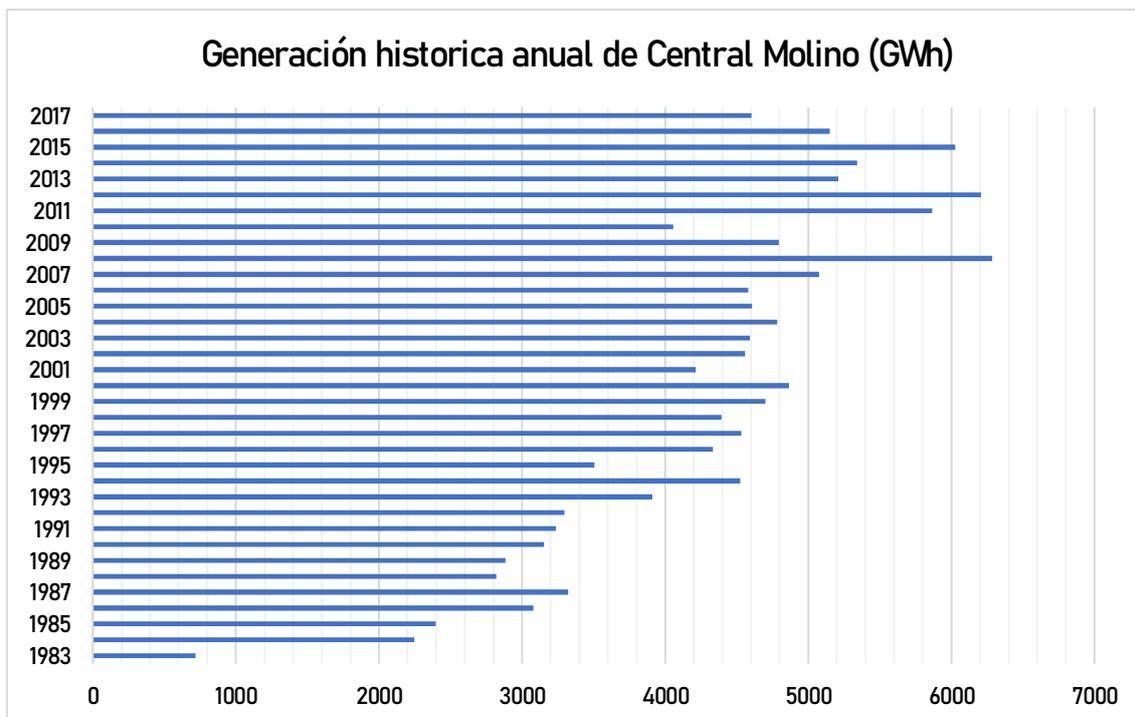


Ilustración 52. Generación energética histórica de la central Paute-Molino. Fuente: CELEC Hidropaute, 2017

Central Hidroeléctrica Paute-Sopladora

La central Paute-Sopladora es la más reciente del complejo Paute-Integral, el cual entró en funcionamiento en 2016. A diferencia de las anteriores, esta central no cuenta con un embalse propio para tomar el agua a turbinar. La forma en que obtiene el agua es mediante un conducto previo a la descarga del agua turbinada de la central Molino. Este conducto lleva el agua a la casa de máquinas de la central Sopladora para después descargarla agua abajo. La casa de máquinas cuenta con tres turbinas tipo Francis, con una potencia nominal individual de 163.28 MW (ver Ilustración 53).

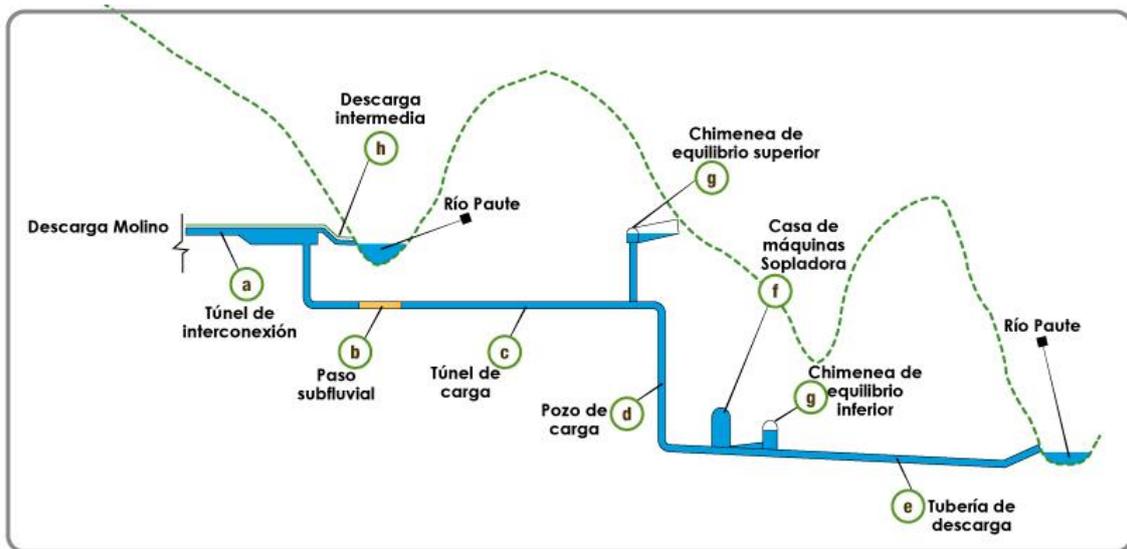


Ilustración 53. Esquema de la central Sopladora. Fuente: CELEC

Con los datos obtenidos, se procedió a detallar la producción correspondiente al año 2017 de los informes de Hidropaute, tal como se muestra en la Ilustración 54. El caudal que ingresó al cuarto de máquinas refleja la misma tendencia de la generación de la central Molino, por la misma razón enunciada anteriormente: debido a la regulación del embalse Mazar, el caudal de la central Sopladora es lo más regular posible. No obstante, se puede notar las bajas de caudal en los meses de estiaje de alrededor de un 20 % en comparación con los caudales de su contraparte en los meses de lluvias.

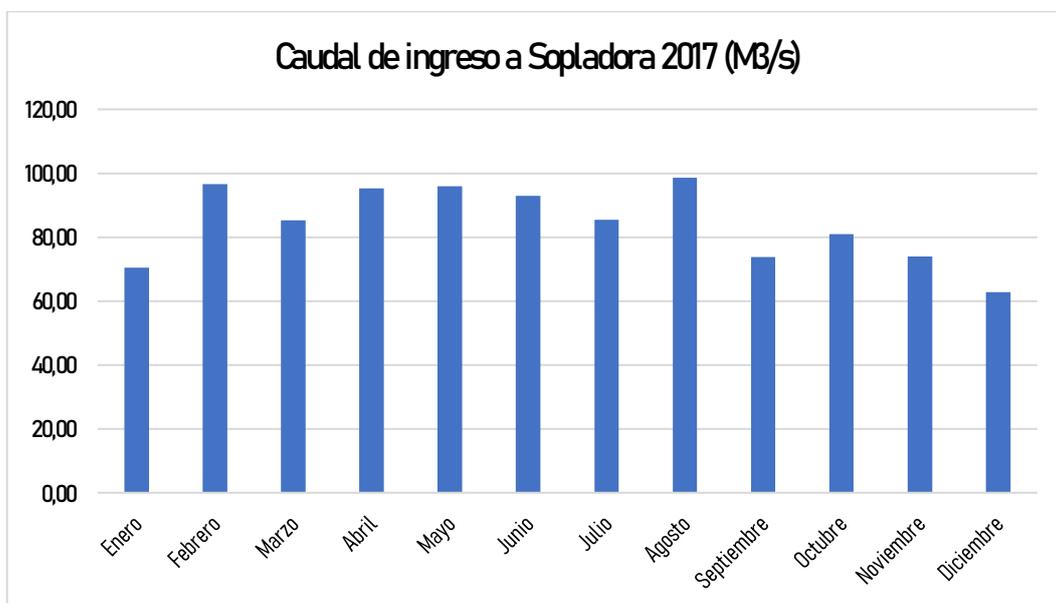


Ilustración 54. Caudal mensual de central Sopladora, 2017. Fuente: CELEC Hidropaute, 2017

Ahora bien, la diferencia es más notoria en cuanto a la generación. En la Ilustración 55, sobre la generación neta, se puede observar la disminución de la generación en temporada de estiaje. Esta disminución cuenta con el mismo porcentaje del caudal ingresado, es decir, un 20 %.

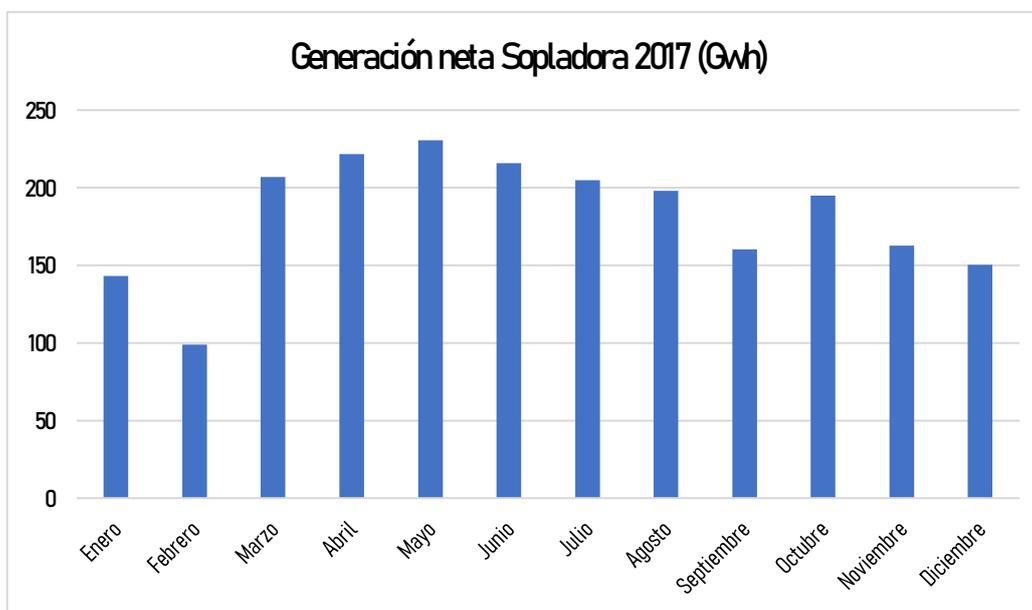


Ilustración 55. Generación neta mensual de central Sopladora, 2017. Fuente: CELEC Hidropaute, 2017

2.3 Producción de centrales termoeléctricas

Las centrales termoeléctricas generan una cantidad considerable de energía eléctrica para el país. Sin embargo, también producen una cantidad significativa de contaminación al medio ambiente, debido al uso de los combustibles fósiles, aunque existe una excepción en el caso del bagazo de caña.

Si bien las centrales termoeléctricas han servido como apoyo para la generación de energía, especialmente en las temporadas de estiaje, su uso recomendado es bajo debido a la contaminación que provocan. En Ecuador, en los últimos años ha disminuido su uso; sin embargo, este continúa, aunque en menor magnitud en comparación con décadas atrás. La utilización de las centrales termoeléctricas se da de manera constante en el año entero, aunque existen picos como la temporada de estiaje en las zonas donde se encuentran las principales centrales hidroeléctricas.

Esta es la razón por lo que se propuso analizar la producción anual de energía térmica, permitiendo evidenciar la generación mensual de este tipo de centrales

eléctricas. A continuación, en la Ilustración 56 se muestra la producción mensual de energía térmica, el cual solo se tomó en cuenta el tipo de empresa generadora, debido a que estas son, en su mayoría, las que aportan energía al sector público. Alrededor del 95 % de energía generada por las empresas se dirige al servicio público.

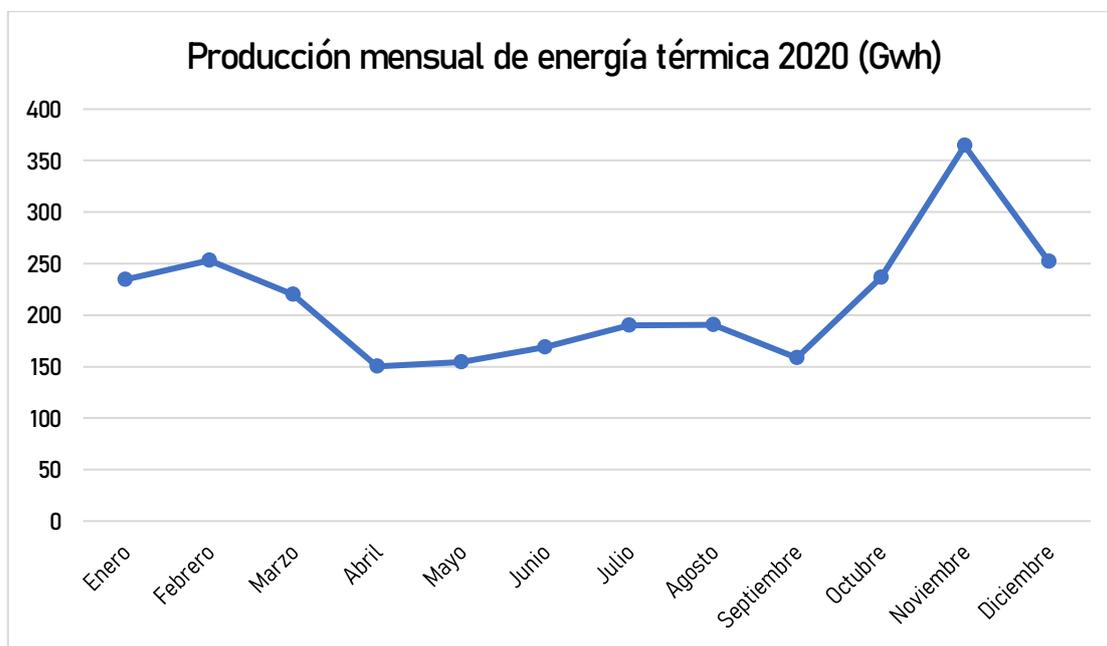


Ilustración 56. Producción mensual de energía térmica de empresas generadoras. Fuente: Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables (2021)

En la Ilustración 56 se perciben los picos de generación de energía, especialmente en el mes de noviembre. De igual forma, se puede ver el incremento de producción general en la temporada de estiaje durante los meses octubre-marzo, así como la disminución de producción en la temporada de lluvias durante los meses abril-septiembre.

Con los datos observados, se obtuvo los promedios de producción de cada temporada y se asumió la producción energética en la temporada de lluvias como base, fue posible calcular el aumento de la producción energética por fuentes térmicas, lo que muestra un aumento del 25 % aproximadamente.

En el informe de la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables (2021), se expuso una tabla con los valores de la cantidad de combustibles empleados para la producción energética del país (ver Tabla 13).

Tabla 13. Tabla de consumo de combustibles para la producción energética de 2020. Fuente: Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables (2021)

Consumo de combustibles para la producción de energía (2020)								
Tipo de empresa	Fuel Oil (Mgal)	Diésel (Mgal)	Gas Natural (kpcx10 ⁶)	Residuo (Mgal)	Crudo (Mgal)	GLP (Mgal)	Bagazo de caña (kt)	Biogás (m ³)
Generadora	96.9	21.67	8.03	1.28	9.83	-	402.56	26 724 994.15

En la Tabla 13 se contempla la gran cantidad de *fuel oil*, diésel, gas natural y crudo; mientras que, en menor medida, se nota el empleo de biogás y el bagazo de caña, estos últimos son los que menos contaminan en contraste con el grupo anterior. Cabe recalcar que el uso del gas licuado de petróleo (GLP) no se empleó en el año 2020.

Con la cantidad de combustible empleado para la producción de energía, se obtuvo un valor aproximado del costo de la producción, y solo se consideró los precios de los combustibles. Cabe mencionar que solo se tuvieron en cuenta los combustibles derivados de petróleo, y asimismo, las empresas generadoras. Lo anterior, debido a que el monto aumentaría si se toman los factores previamente mencionados, esta decisión se tomó como un “factor de seguridad” para el monto calculado (ver Tabla 14).

Tabla 14. Monto empleado en combustibles para generación energética

Combustible	Precio		Valor
	Precio (USD)	Unidad	
Diésel	0.900704	Galones	\$ 19 518 255.68
<i>Fuel oil</i>	0.537600	Galones	\$ 52 093 440.00
Gas natural	3.127616	KPC	\$ 25 114 756.48
Crudo	0.398865	Galones	\$ 3 920 842.95
Residuo	0.445802	Galones	\$ 570 626.56
Total			\$ 101 217 921.67
25 % total			\$ 25 304 480.42

Los valores de los combustibles están relacionados con valores más actuales impuestos por decreto ejecutivo, mostrados en documentos pertenecientes a la Empresa Pública de Hidrocarburos del Ecuador (PETROECUADOR). En la Tabla 14 se muestra un monto total de \$ 101 217 921.67, lo que quiere decir que las empresas generadoras emplearon este monto para la compra de combustibles fósiles en el año 2020. Sin embargo, este cálculo se expuso con la intención de obtener un valor aproximado del gasto extra en combustibles en temporadas de estiaje. Esto último guarda estrecha relación con el aumento de producción de las centrales térmicas en la temporada de estiaje, el cual fue de aproximadamente el 25 % en el año 2020. Esto arrojó un valor de \$ 25 304 480.42, se concluye que este es el monto extra aproximado empleado en combustibles para la generación eléctrica en los meses con estiajes del año 2020.

Además de suponer un gasto al país debido al consumo de combustible por las centrales termoeléctricas, estas también aportan a la contaminación ambiental. En su mayoría, la cantidad de toneladas de CO₂ emitidas por las centrales termoeléctricas llegan a miles, especialmente antes de la expansión de las hidroeléctricas en 2015. En esta época se reflejó la disminución de emisión de CO₂. Actualmente, se sigue emitiendo CO₂, pero en menor medida (ver Ilustración 57).

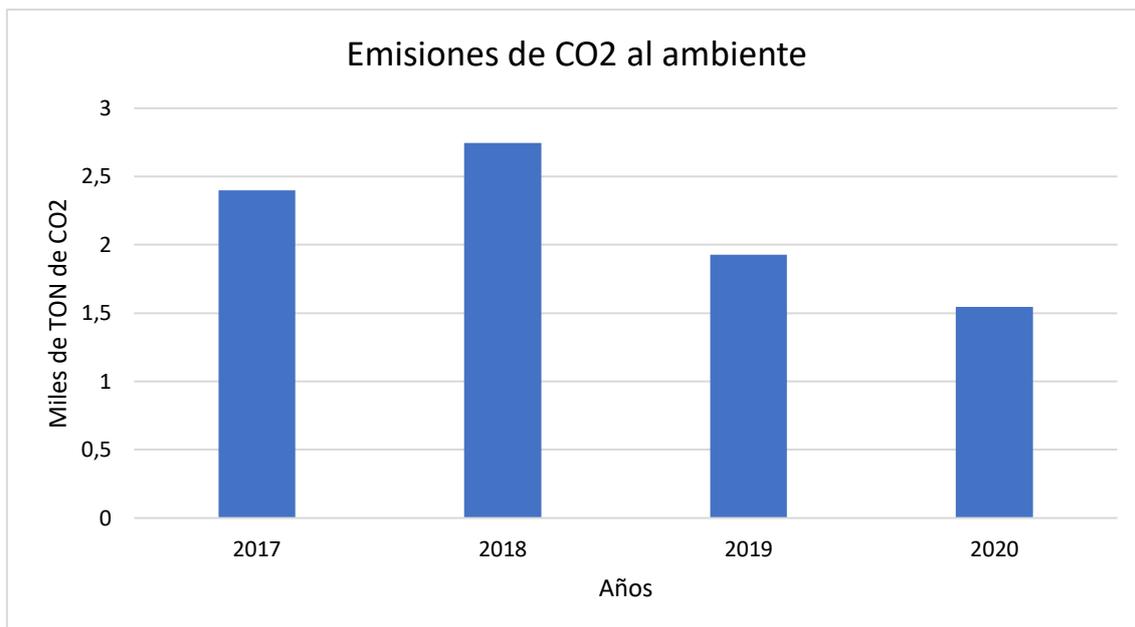


Ilustración 57. Emisiones de CO₂ producto de generación eléctrica en el año 2020. Fuente: CENACE, 2020

2.4 Transacciones internacionales de energía

Como se expuso en el capítulo anterior, en tiempos en los que la demanda energética supera la producción, el país hace uso de las centrales termoeléctricas. La segunda opción que emplea el país es la importación energética de países vecinos. En este caso, se hace especial énfasis en Colombia, debido a que, en el año 2020 y en años pasado, ha sido el mayor exportador energético para Ecuador.

Ecuador se ha destacado como importador energético; sin embargo, esto cambió y se convirtió en un país exportador. En 2020, el país pudo exportar una cantidad importante de energía a países vecinos como Colombia y Perú. La cantidad energética exportada se dio gracias al exceso de energía producto de las temporadas de lluvias. Así como las temporadas de lluvias permiten exportar, las temporadas secas o de estiaje no lo permiten y, según la severidad, obliga a importar energía. A continuación, en la Tabla 15 se muestra el comportamiento de las energéticas del país en el año 2020.

Tabla 15. Energía importada de Colombia y sus valores mensuales en el año 2020. Fuente: Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables (2021)

País	Mes	Energía importada (MWh)	Valor (USD)
Colombia	Enero	154.68	\$ 12 604.72
	Febrero	52.36	\$ 6209.84
	Marzo	1006.74	\$ 43 573.58
	Abril	7.29	\$ 184.63
	Mayo	12.02	\$ 988.88
	Junio	21.22	\$ 1218.08
	Julio	34.89	\$ 750.49
	Agosto	1897.78	\$ 69 672.03
	Septiembre	146.21	\$ 4673.18
	Octubre	12 657.82	\$ 457 606.24
	Noviembre	202 063.01	\$ 10 868 195.23
	Diciembre	32 739.66	\$ 1 206 686.40
Total		250 793.68	\$ 12 672 363.30

En la Tabla 15 se observan los meses en los que se ha importado más y los meses en los que se ha importado menos. Entre los meses más representativos de importación se encuentran octubre, noviembre y diciembre; mientras que en los demás meses la importación de energía fue muy baja, tanto que algunos meses son casi nulos. Cabe recalcar que las importaciones energéticas importantes se realizaron en la temporada de estiaje y en un mes en específico: noviembre, debido a la severa situación hidrológica que atravesó el país (CENACE, 2020).

A continuación, en las ilustraciones 58 y 59 se visualiza la energía importada y su valor en el año 2020.

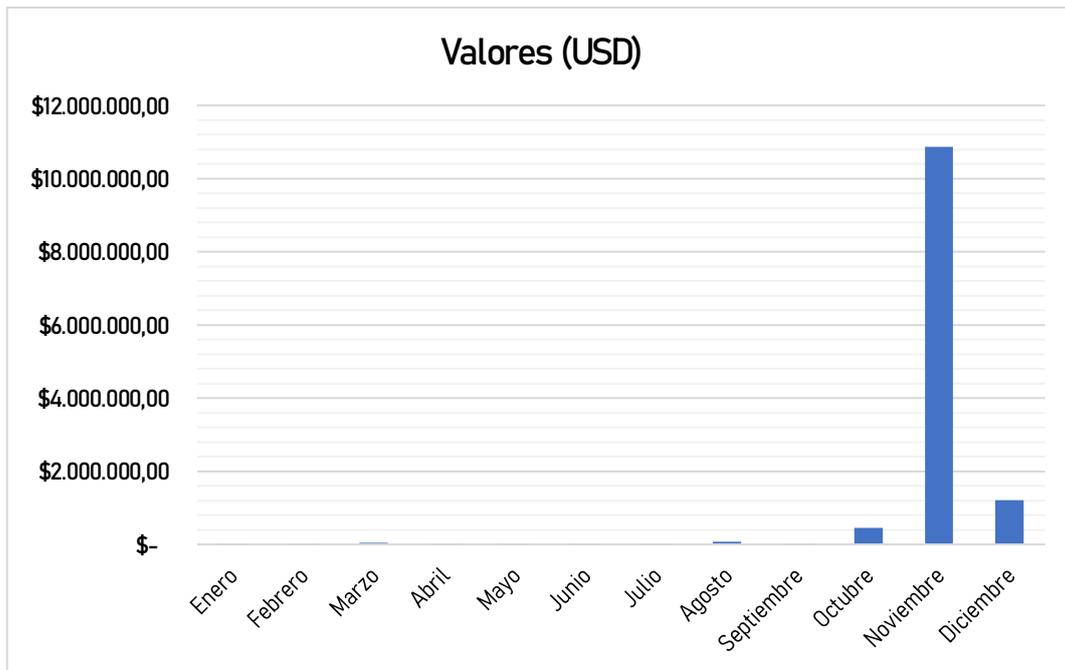


Ilustración 58 Valores de las importaciones energéticas mensuales de Colombia del año 2020. Fuente: Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables (2021)

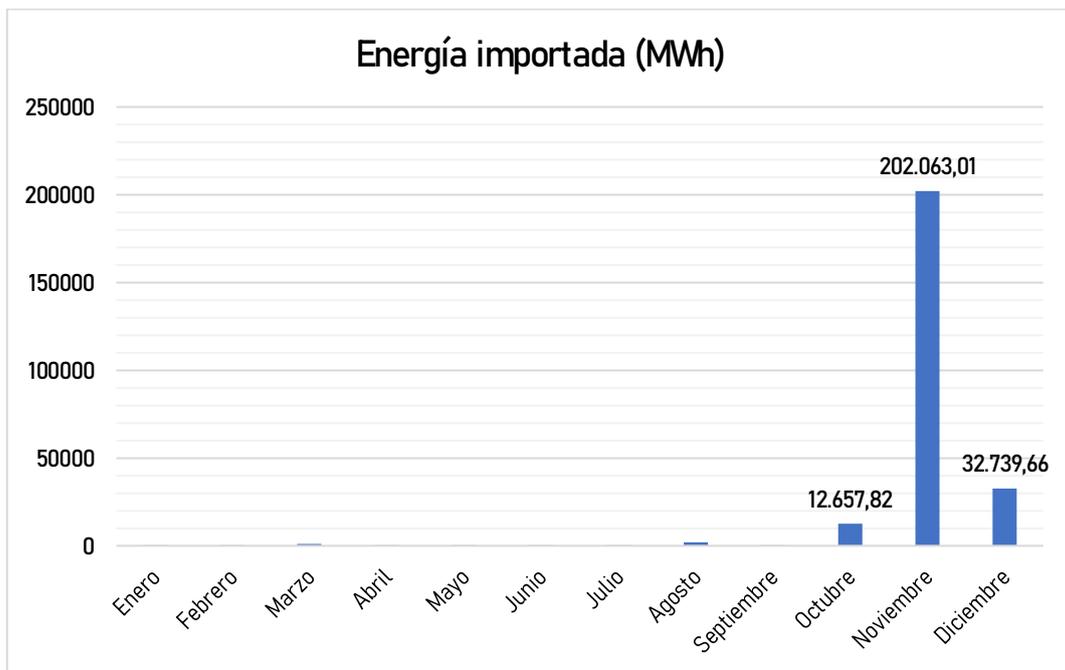


Ilustración 59. Energía importada mensual de Colombia del año 2020. Fuente: Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables (2021)

En las ilustraciones anterior se observa de manera más rápida que las importaciones se realizan en los tres últimos meses del año. Los valores de los meses de octubre, diciembre y principalmente noviembre representan el 98 %

de la energía importada en el año 2020. Este valor es aproximadamente de \$ 12 532.487 y el restante se distribuye a lo largo del año en pequeñas importaciones (ver Tabla 15).

Observaciones

Los datos obtenidos permitieron evidenciar el aumento de la producción de las termoeléctricas, además de la compra de energía eléctrica a Colombia. Esto coincide con la temporada de estiaje del régimen oriental. En ese sentido, se infiere que el país, cada vez que la producción de energía es baja o no, satisface la demanda nacional, debido a situaciones hidrológicas como las sequías. De esa manera, se procede el aumento de producción de centrales termoeléctricas y compra de energía a otros países, en este caso, a Colombia.

CAPÍTULO 3: CENTRALES HIDROELÉCTRICAS REVERSIBLES

Las centrales hidroeléctricas reversibles o por bombeo son un tipo de central hidroeléctrica que comprende dos embalses situados en diferentes cotas. El embalse inferior es el encargado de bombear agua al embalse superior, mientras que el embalse superior es el encargado de almacenar y surtir de agua al embalse inferior cuando se requiera generar energía. En otras palabras, el embalse superior cumple la función de un almacenador de energía (Viedma y Zamora, 1997). El objetivo de este tipo de hidroeléctrica es funcionar como una central hidroeléctrica convencional en las horas de alta demanda eléctrica o cuando el flujo es bajo, mientras que en las horas de baja demanda funciona en su modo de almacenamiento por bombeo (Guyer, 2019).

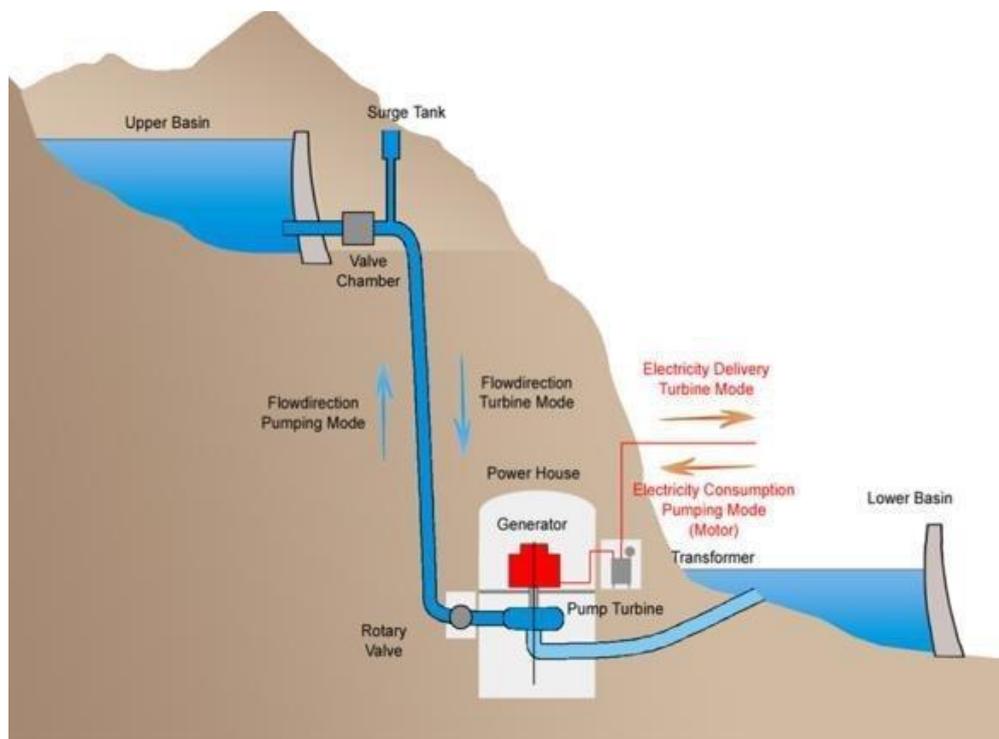


Ilustración 60. Esquema de central hidroeléctrica reversible. Fuente: Navalón, B.

Para realizar sus funciones distintas, la central suele estar conformada por grupos de motobombas o turbinas reversibles. Lo más común es que se encuentre conformada por turbinas reversibles, las cuales actúan como bombas en los casos en los que se desea enviar agua al embalse superior. En contraste, cuando se necesita enviar agua al embalse inferior, la turbina reversible actúa como una turbina convencional.

3.1 Historia

El uso de almacenamiento por bombeo data de 1890 en Italia y Suiza. Sin embargo, no fue sino hasta 1930 que, con la implementación de turbinas reversibles, en Connecticut (Estados Unidos) se empleó la primera central hidroeléctrica reversible como tal (Popular Science, 1930). Las centrales hidroeléctricas reversibles se diseñaron originalmente con el fin de satisfacer la demanda de energía en horas de alta demanda y precios energéticos altos (Jiménez, 2012). Este es la principal utilidad que tiene este tipo de central hidroeléctrica y también la principal razón por la cual se desarrolla este tipo de centrales en el mundo.

3.2 Funcionamiento

El funcionamiento consiste en que se bombee agua del embalse inferior o cauce natural al embalse superior, de tal forma que gane energía potencial gravitatoria que posteriormente se transformará en energía eléctrica mediante los generadores. Este proceso se realiza típicamente en las noches o fines de semana, puesto que la demanda energética es baja, pero la razón principal es porque existe excedente de energía en esos periodos. En cambio, en los periodos de alta demanda eléctrica, se regresa el agua previamente bombeada del embalse superior al inferior. En el trayecto, la energía potencial almacenada por el agua se convierte en energía cinética, gracias a la primera ley de la termodinámica. Una vez se obtiene la energía cinética, se transforma en energía mecánica rotatoria a través las turbinas, y, finalmente, los generadores la convierten en energía eléctrica.

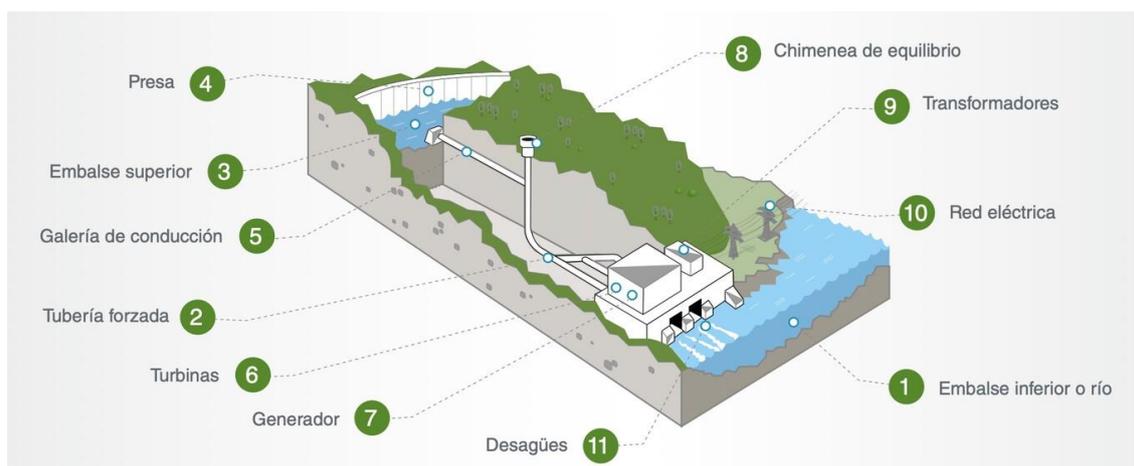


Ilustración 61. Partes de una central hidroeléctrica reversible. Adaptado de: Iberdrola

De acuerdo con Jiménez (2012): “Su funcionamiento constituye una forma de optimizar económicamente la explotación de una red de suministro eléctrico, lo que permite con ello una gestión más apropiada de la energía, y almacenar los excedentes que se genera en las horas de baja demanda, y con ello, suplir de forma económica y eficiente, la demanda en horas de mayor demanda, donde la energía es más cara”.

Las centrales hidroeléctricas reversibles, además de cumplir sus respectivas funciones en las horas de alta y baja demanda, ofrecen funciones complementarias que ayudan a un mejor desempeño en la red eléctrica, tales como nivelación de carga, control de frecuencia y capacidad de arranque en cero. Esto garantiza la estabilidad del sistema en casos de caídas en la red. Entre otras de sus funciones complementarias e intrínseca se encuentra la reducción de emisiones de GEI, dado que las centrales reemplazan el uso de las centrales termoeléctricas en horas de alta demanda.

3.3 Bomba-turbina

Las bombas-turbinas o turbinas reversibles es algo característico de este tipo de centrales hidroeléctricas, por lo que, a continuación, se exponen algunas de sus características. Como principal característica se encuentra la de poder trabajar en dos modos: modo turbinas y modo bomba. El modo turbina se emplea cuando se libera agua del embalse superior y el modo bomba cuando se busca almacenar agua en el embalse superior.

Entre sus principales ventajas, se destacan:

- Los bajos costos de inversión en comparación con las turbinas convencionales. Estos costos llegan a ser hasta menores del 50 %, especialmente en las de menos de 50 KW de potencia.
- La accesibilidad del producto y sus repuestos es muy alta en el mundo.
- No se necesita equipos ni habilidades especiales.

Entre sus desventajas, se encuentran:

- Menor eficiencia máxima en comparación con las turbinas actuales.
- La eficiencia de los ciclos de bombeo y turbinaje.
- Control hidráulico poco eficaz a diferencia de las turbinas convencionales.

A pesar de haberse mencionado algunas de sus desventajas, la buena selección, buena ubicación de la bomba turbina y uso justificado lleva a reducir las desventajas al mínimo. Además, la baja producción a lo largo de su vida útil es compensada por la ventaja de costos de inversión que tienen las bombas turbinas en comparación con las turbinas convencionales (Chapallaz, Eichenberger y Fischer, 1992).

Con respecto al diseño de bombas, se identificaron tres tipos de bombas. La primera es la bomba de flujo radial o centrífuga, la cual permite alcanzar una gran altura cerca a los 200 metros, además de funcionar con un caudal bajo y con altas presiones. Esta bomba está pensada para bombear un volumen no tan grande de agua en comparación con las demás. La segunda es la bomba de flujo mixto, este es un intermedio entre los tres tipos de bombas. Alcanza una altura de alrededor de 36 metros y trabaja con un caudal medio. La tercera es la bomba de flujo axial, está dirigida a manejar grandes volúmenes de agua a una altura baja de aproximadamente 15 metros.

Los rangos en lo que se puede aplicar una bomba se puede mejorar a través de las bombas multietapas, lo que supondría una fila de bombas que resultaría en una mayor elevación del agua, lo que lograría alcanzar grandes alturas. Otra mejora puede ser mediante bombas en paralelo, de tal forma que se duplique la capacidad de bombeo. A continuación, en la Ilustración 62 se muestran los rangos de aplicación de las turbinas.

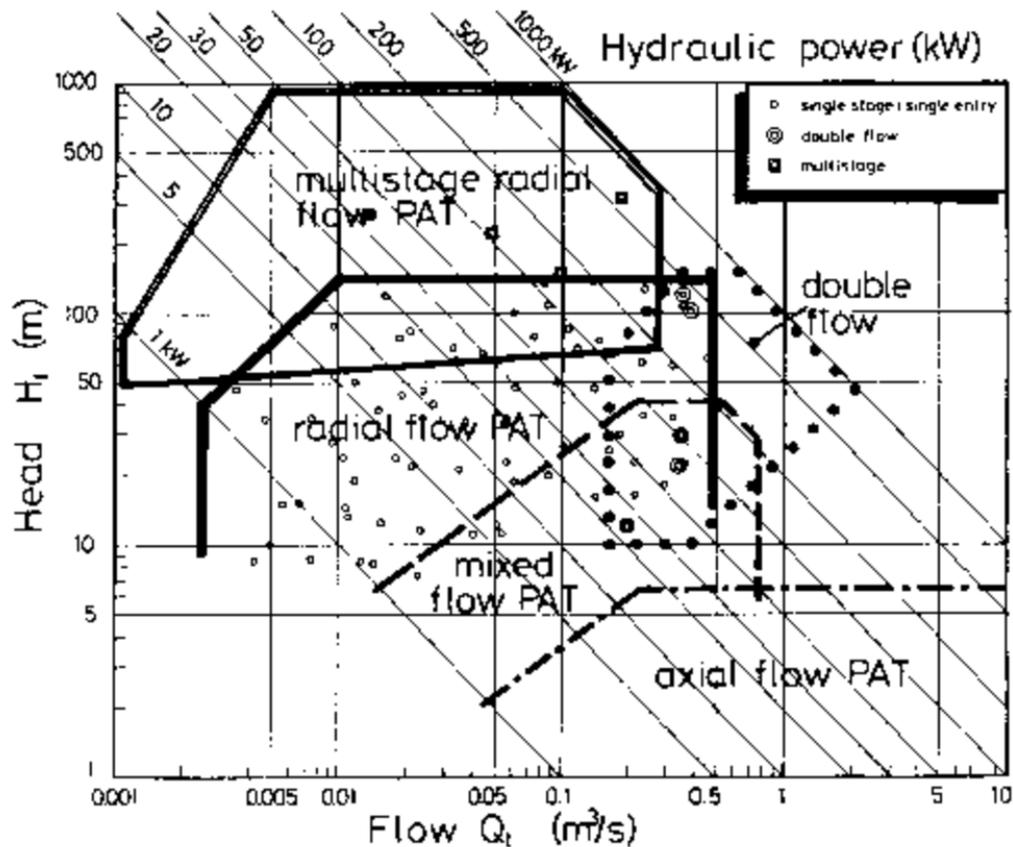


Ilustración 62. Rango de aplicación de diferentes tipos de bombas-turbina. Fuente: Chapallaz, Eichenberger y Fischer (1992)

3.3 Tipos de centrales hidroeléctricas reversibles

Según Inga (2015), existen tres tipos de centrales hidroeléctricas según la ubicación del reservorio inferior:

- Centrales hidroeléctricas reversibles tradicional.
- Centrales hidroeléctricas reversibles con agua subterránea.
- Centrales hidroeléctricas reversibles con agua de mar.

3.3.1 Centrales hidroeléctricas reversibles tradicional

Este tipo de centrales son las más comunes, conformada por dos embalses superficiales: el superior y el inferior. El embalse superior puede ser natural o artificial. Puede construirse a partir de un embalse natural y, de esa manera, aumentar su volumen de almacenamiento, lo cual garantiza un mejor ciclo de bombeo y generación energética. El embalse inferior puede ser un cauce natural

o artificial. El embalse puede crearse a partir de una presa, como se observa en la Ilustración 63.



Ilustración 63. Central hidroeléctrica reversible Cortes- La Muela en Valencia, España.

Adaptado de: ABC

Cabe señalar que los precios pueden ser muy reducidos si se emplean embalses naturales o embalses artificiales ya existentes. En el caso del cuarto de máquinas, este puede colocarse en la superficie del terreno o por debajo de él.

3.3.2 Centrales hidroeléctricas reversibles con agua subterránea

Este tipo de centrales funcionan de manera similar al anterior y siguen el mismo principio; sin embargo, este tipo varía en su embalse inferior. El embalse inferior de este tipo de hidroeléctricas son los acuíferos o excavaciones profundas, en vez de un cauce natural superficial o un embalse artificial superficial.

Su funcionamiento es a través de un ciclo, puesto que el agua bombeada del reservorio subterráneo a la superficie es retornada al reservorio subterráneo. Según Allen et al. (1984), este tipo de hidroeléctricas no está limitado a su topografía, además de tener un impacto mínimo en el medio ambiente en

comparación con las hidroeléctricas convencionales. En este caso, la casa de máquinas debe de estar ubicada bajo la superficie (ver Ilustración 64).

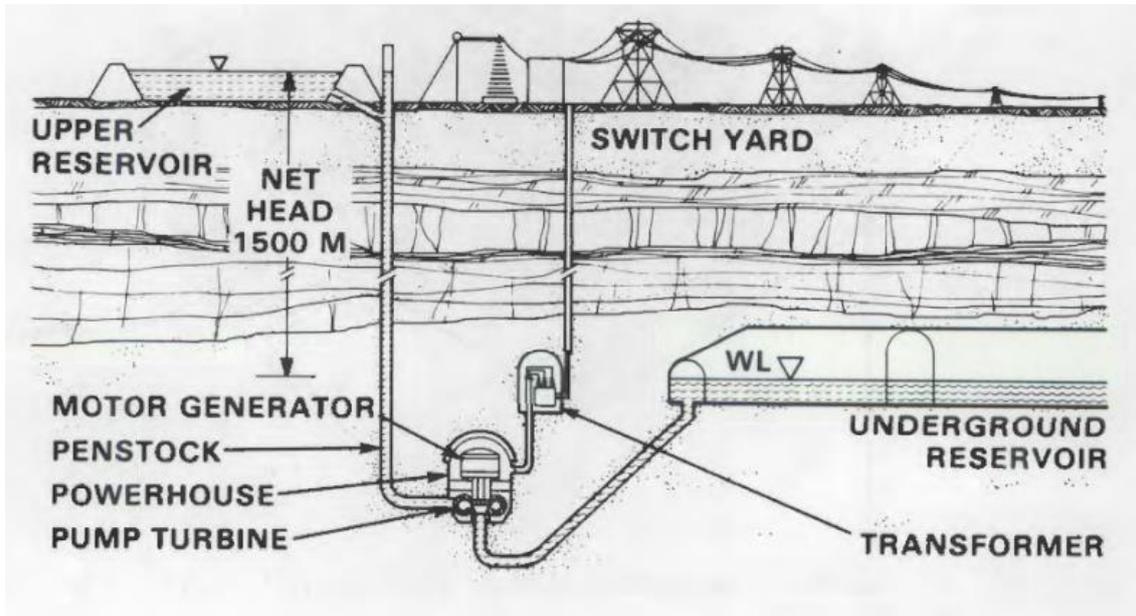


Ilustración 64. Esquemas de hidroeléctrica reversible con agua subterránea. Fuente: Allen et al. (1984)

3.3.3 Centrales hidroeléctricas reversibles con agua de mar

Este tipo de central funciona con el mismo principio de los anteriores, su diferencia se encuentra en el reservorio inferior. El reservorio inferior es el mar, este es el motivo por el cual se ubica cerca de relieves costeros y se contempla como solución energética para las islas (López, 2022).

Un ejemplo de este tipo de hidroeléctrica existió en Japón, Okinawa, como se observa en la Ilustración 65. Entró en función en 1999 hasta el 2016. Este hidroeléctrica no contaba con una planta desalinizadora.



Ilustración 65. Central hidroeléctrica reversible en Okinawa Yanbaru, Japón. Adaptado de: The Conversation

En la actualidad, España se encuentra en trámites administrativos para la realización del proyecto de la hidroeléctrica reversible Soria-Chira, la cual contará con una planta desalinizadora y tendrá un coste aproximado de 320 millones de euros (ver Ilustración 66).

**ESQUEMA DEL SISTEMA DE APROVECHAMIENTO HIDROELÉCTRICO
POR BOMBEO REVERSIBLE SORIA-CHIRA**

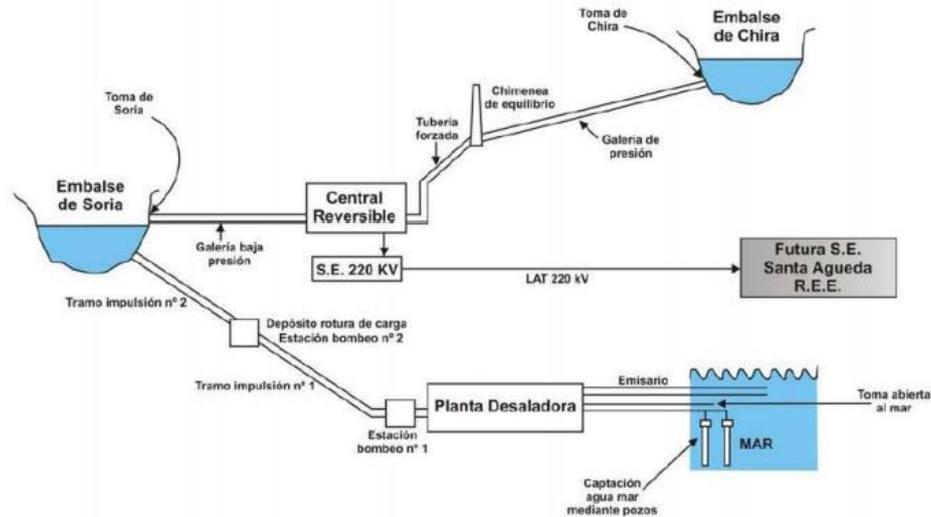


Ilustración 66. Esquema de funcionamiento de la central hidroeléctrica reversible Soria-Chira, España. Fuente: López (2022)

Por su parte, Wickramarathna (2011) expuso otra clasificación, el cual se basa en el United State Corps of Engineers (USACE). En ella se encuentran dos tipos de hidroeléctrica reversible:

- Central de almacenamiento por bombeo puro.
- Central de bombeo y almacenamiento natural.

3.3.4 Centrales de almacenamiento por bombeo puro

En este tipo de central, solo el reservorio inferior recibe agua de algún cauce natural, mientras que el reservorio superior no posee ingreso de algún flujo natural; por lo tanto, solo ingresa agua enviada del reservorio inferior. El agua almacenada en el reservorio superior recircula entre los dos reservorios, de tal forma que genera energía (ver Ilustración 67).

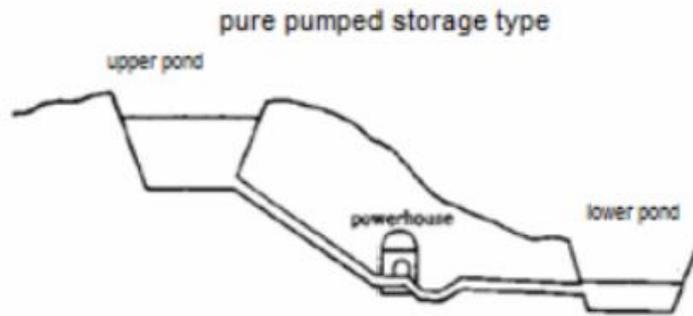


Ilustración 67. Esquema de central de almacenamiento por bombeo puro. Fuente: Wickramarathna (2011)

3.3.5 Centrales de bombeo y almacenamiento natural

En este tipo de central, el reservorio superior recibe agua de algún flujo natural, mientras que el reservorio inferior solo recibe agua del reservorio superior. Posteriormente, el reservorio inferior bombea el agua y la regresa al reservorio superior, justo donde pasa el cauce natural. La energía se genera con el agua recibida del reservorio donde pasa el flujo natural, para luego retornarla por bombeo (Wickramarathna, 2011) (ver Ilustración 68).

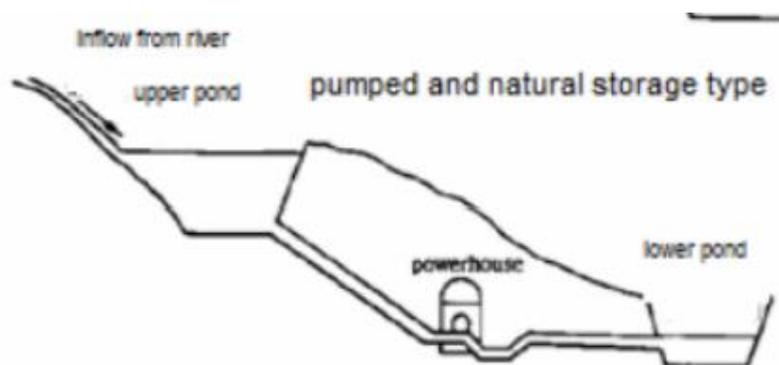


Ilustración 68. Esquema de central de bombeo y almacenamiento natural. Fuente: Wickramarathna (2011)

3.4 Funciones complementarias

A continuación, se describen algunas de las funciones complementarias de las centrales hidroeléctricas reversibles, las cuales permiten mejorar la calidad del servicio eléctrico.

3.4.1 Nivelación de carga

Esta función es característica de este tipo de centrales hidroeléctricas y está relacionada con la razón de su uso original. Consiste en emplear los excedentes

de energía de los periodos de menor demanda energética para bombear agua al reservorio superior, para luego emplear el agua en la generación de energía en las horas de alta demanda energética.

Esta función contribuye al óptimo funcionamiento de las demás plantas de generación energética, como las centrales termoeléctricas, lo que permite que estas no realicen cambios bruscos en su producción diaria y, en cambio, trabajen lo más regular posible. Un beneficio de esta función es la reducción de emisiones de gases al medio ambiente, de tal forma que se reduce el uso de las centrales termoeléctricas. Además, con ello se controla el aumento considerable de los costos de operación y mantenimiento que estas centrales sufren por el aumento de su producción por las demandas pico diarias (Jiménez, 2012) (ver Ilustración 69).

Concepto de Nivelación de Carga en un Sistema Eléctrico

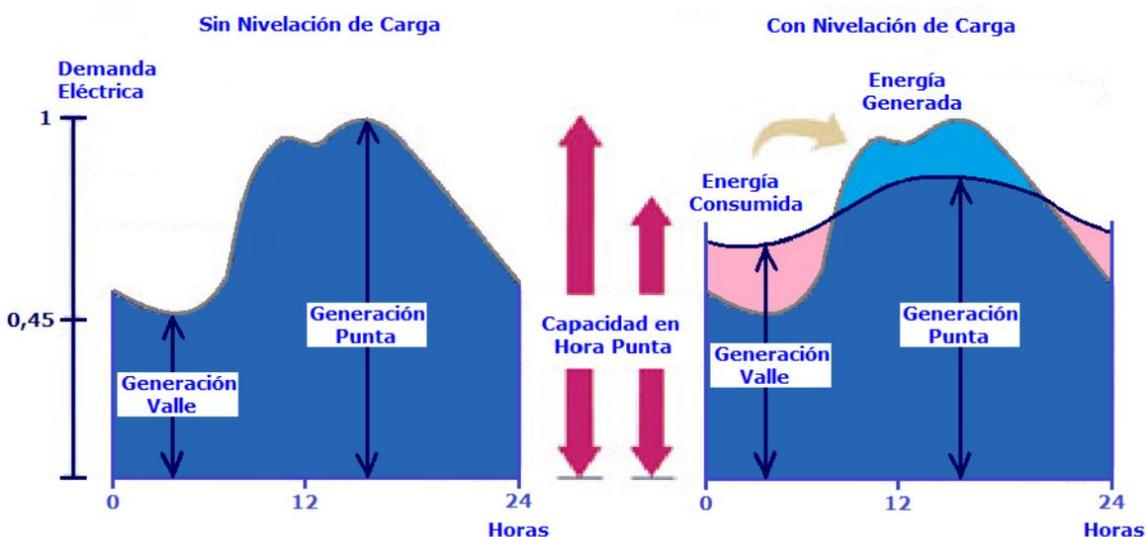


Ilustración 69. Proceso de nivelación de carga en un sistema eléctrico. Fuente: Jiménez (2012)

3.4.2 Regulación de la frecuencia

La frecuencia de la red es una variable que muestra el balance entre la demanda y la generación total en tiempo real. Si la demanda es mayor a la generación, la frecuencia tiende a bajar; mientras que, si la generación es mayor a la demanda, la frecuencia tiende a aumentar. Estas fluctuaciones se producen en los fuertes desequilibrios producto de estas diferencias, pudiendo provocar variaciones de velocidad en las máquinas, problemas de funcionamiento en las instalaciones de

autogeneración, problema de fatiga en los alabes de las turbinas, entre otros. Por ello, lo recomendado sería evitar este problema, y así mantener la demanda y generación equilibradas (Pérez, 2015).

Estos problemas se controlan mediante embalses de regulación, por lo que este tipo de centrales los llevan como una función intrínseca, puesto que cuenta con un embalse. Frente a las fluctuaciones en la frecuencia, las centrales hidroeléctricas reversibles permiten una rápida respuesta debido a la cercanía de los embalses. Estos problemas pueden controlarse en minutos si el criterio optimiza correctamente, lo que significaría una gran mejora para el servicio (Jiménez, 2012) (ver Ilustración 70).

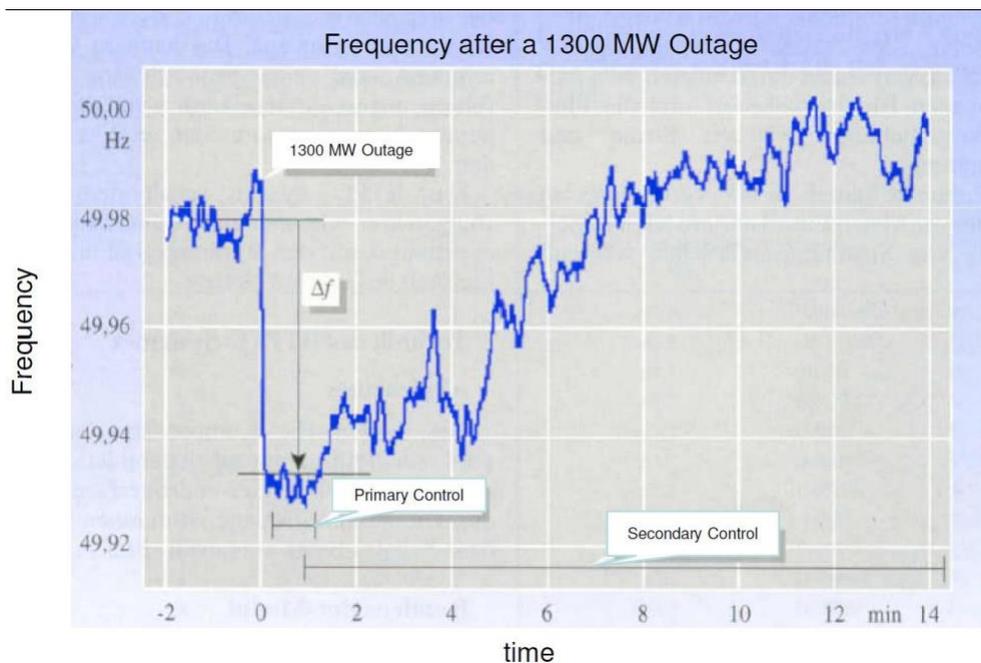


Ilustración 70. Fructuaciones en un control de frecuencia. Fuente: Huber y Gutschli (2010).

Obtenido: Jiménez (2012)

3.4.3 Capacidad de arranque en cero

Una función muy característica de este tipo de centrales es la de poder operar sin depender de fuentes externa, puesto que estas pueden operar de manera independiente, por lo que es de mucha ayuda cuando existen suspensiones temporales de la red principal. Las centrales hidroeléctricas reversibles pueden proveen energía en cuestión de minutos, lo que permite el rápido regreso de sus funciones de las otras centrales que tienen sus funciones suspendidas. También

puede mantener en función a otras centrales como las termoeléctricas, sobre todo cuando la red principal no puede hacerlo (Jiménez, 2012).

3.5 Implementación de otras fuentes energéticas

Las centrales hidroeléctricas reversibles se complementan muy bien junto a las demás centrales de generación de energía. Entre las principales razones por las que se acoplan bien se encuentra la existencia de excedentes de energía en las distintas centrales energéticas, dado que las centrales hidroeléctricas reversibles funcionan como un almacenador de excedente energético gracias a su embalse. Otro motivo es el factor económico, puesto que existen algunos tipos de centrales cuyo costo de operación es muy elevado, y cuando se acoplan con las centrales reversibles tienden a bajar su costo de operación y mantenimiento. Finalmente, se encuentra el factor ambiental, toda vez que las centrales hidroeléctricas reversibles permiten la disminución de emisión de gases dañinos para el medio ambiente de ciertas centrales energéticas, debido a su reemplazo en cuanto al funcionamiento en horas pico (Jiménez, 2012).

A modo de ejemplo, las centrales hidroeléctricas reversibles se asocian a las centrales nucleares, debido a su gran sinergia con estas. Las centrales nucleares funcionan como centrales principales. En cuanto a las centrales reversibles, esas estas funcionan como complemento de estas, dado que en el día funcionan habitualmente, mientras que en las noches se emplea el excedente de las centrales nucleares para bombear agua al reservorio. El agua almacenada en las noches sirve para la generación energética complementaria en el día, lo que permite que las centrales nucleares no tengan que ajustar su producción por los cambios en la demanda y, de tal forma, operen en su punto óptimo (Deane et al., 2009, como se citó en Jiménez, 2012).

Otro complemento que se ha estudiado mucho es la energía solar y eólica, y así se forma un sistema híbrido. Estos tipos de energía se conciben como los más prometedores a futuro, dado que son muy fluctuantes y son muy dependientes de las condiciones climáticas. Aquí es donde se complementa de muy buena manera con las centrales hidroeléctricas reversibles, puesto que estas pueden proveer energía cuando las condiciones climáticas no permitan generar la suficiente energía de las centrales solares y/o eólicas. Asimismo, las centrales eólicas y/o solares pueden surtir energía para bombeo de las centrales

reversibles en horas donde las condiciones climáticas permitan que exista excedente de energía. Bajo dicha perspectiva, el uso del embalse superior de la central reversible actuaría simplemente como una batería. En la Ilustración 71 se muestra un esquema de este sistema híbrido.

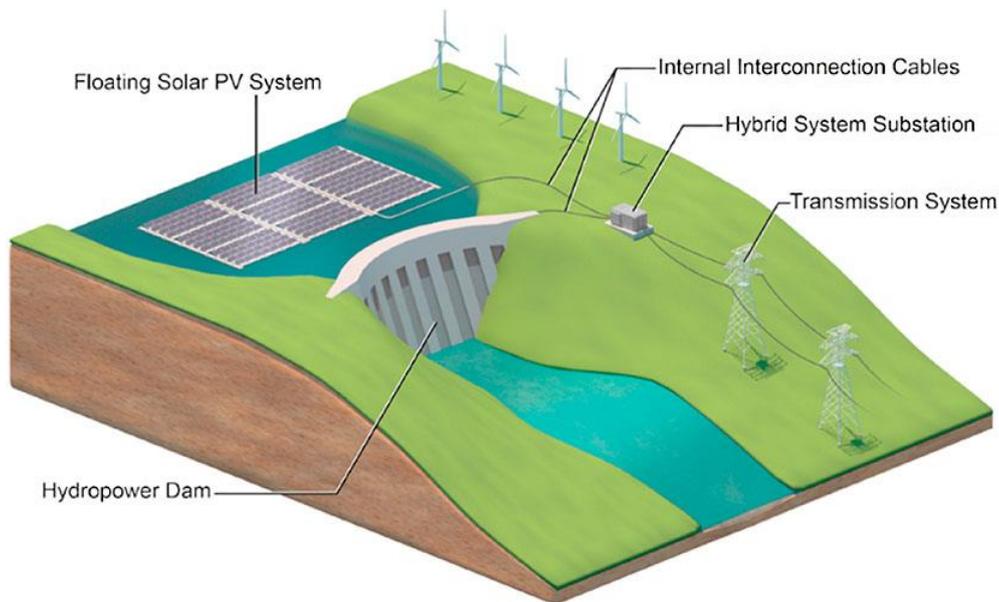


Ilustración 71. Central eléctrica híbrida. Fuente: Lee et al. (2020)

Este sistema de generación de energía es de los más analizados y su potencial es muy prometedor. Actualmente, existe un sistema híbrido solar-eléctrico en Portugal. Estos sistemas híbridos contienen muchos beneficios, y se resalta la mayor generación de energía y mejor optimización de funciones. Estos sistemas pueden ser muy útiles para ejecutar otras funciones mientras se genera energía, por ejemplo, bombear agua con la energía generada o cuando exista excedente de energía solar, hidráulica o eólica (Lee et al., 2020). De esa forma, se aprovecha el recurso al máximo y, por ende, el sistema funcionaría de manera óptima.

3.6 Centrales hidroeléctricas reversibles en el mundo

Alrededor del mundo existe una gran cantidad de centrales hidroeléctricas reversibles, entre ellas se encuentran: Estados Unidos, Japón y casi toda Europa los que tienen la mayor concentración de este tipo de centrales hidroeléctricas. Este tipo de centrales lleva desarrollándose desde hace aproximadamente un siglo, especialmente en Europa, con años de grande desarrollo como lo fue en

la década de los 70, debido al desarrollo en paralelo que tuvo junto a las centrales nucleares.

Así como tuvo años de gran desarrollo, alrededor de la década de los 90 su desarrollo fue muy bajo, puesto que en esta época ya se encontraban ocupados los mejores lugares para desplegar este tipo de centrales y los emplazamientos sobrantes demandaban un mayor coste en su construcción y menores beneficios que los primeros. A todo ello se suma la disminución del desarrollo de las centrales nucleares (Deane et al., 2009, como se citó en Jiménez, 2012).

En tiempos más actuales, este tipo de central tuvo un crecimiento importante cerca del año 2009, debido al crecimiento de las centrales con energía renovables no convencional en el continente europeo, además del cambio de las políticas para fomentar la seguridad de los suministros eléctricos (Jiménez, 2012). Según datos de la Energy Information Administration (EIA), recopilados por Jiménez (2012), se determinó que, al año 2009, Europa tuvo la mayor cantidad de hidroeléctricas reversibles operativas en el mundo, el cual suma una capacidad conjunta de 40 550 MW, lo que equivale a un 4.9 % de la capacidad total del continente. Cabe aclarar que estos países tienen muchas fuentes de energía, entre las que se destacan las nucleares, termoeléctricas e hidráulicas.

Entre los países europeos pioneros en este tipo de centrales se encuentran: Austria, Francia, Alemania, Italia, España y Reino Unido. Actualmente, España es el país que más sobresale. Estos países destacan por potencia instalada. También se encuentran países que predominan por su gran porcentaje de potencia instalada por hidroeléctricas reversibles en comparación con la capacidad instalada total del país. Este es el caso de Luxemburgo con un porcentaje del 64.6 %, seguido de Austria y Eslovaquia con 21.3 % y 12.8 % respectivamente. A continuación, en la Tabla 16 se muestran las potencias instaladas de las hidroeléctricas reversibles de algunos de los países más representativos.

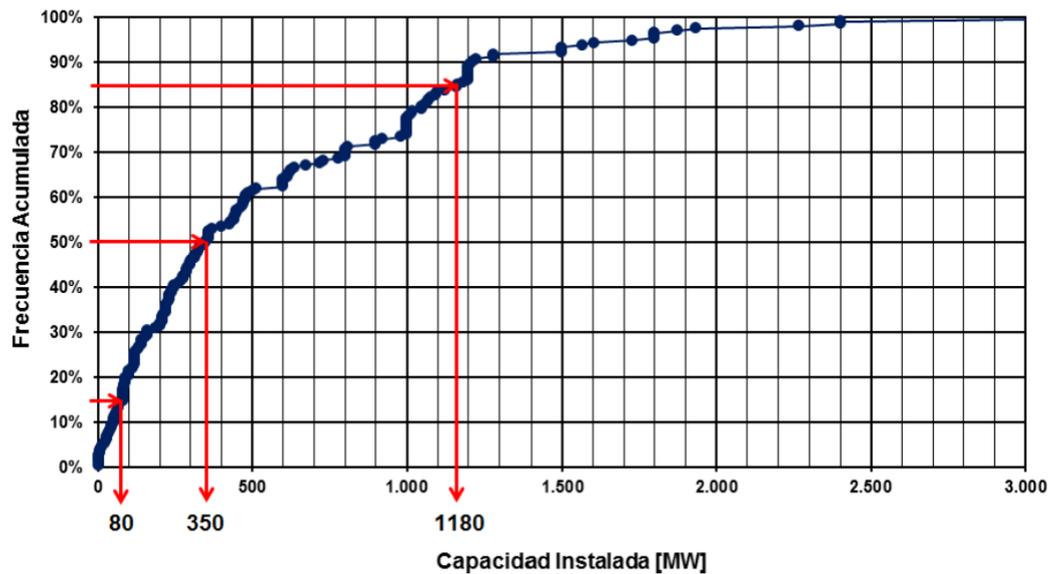
Tabla 16. Capacidad energética instalada (MW) de países poseedores de centrales hidroeléctricas reversibles al año 2009. Fuente: EIA. Obtenido: Jiménez (2012)

País o región	Hidroeléctricas convencionales (MW)	Hidroeléctricas reversibles (MW)	Porcentaje de hidroeléctricas reversibles en comparación con la capacidad instalada total
Estados Unidos	78 518	22 160	2.2 %
Japón	21 784	25 459	1.8 %
China	181 157	15 643	1.8 %
Corea del Sur	1615	3900	4.8 %
Europa	103 110	40 550	4.9 %

3.6.1 Características

Una de las características más relevantes en toda central hidroeléctrica es su capacidad. En una base de datos de 190 centrales hidroeléctricas reversibles realizada por Jiménez (2012), se obtuvieron las siguientes conclusiones (ver Ilustración 72):

- El 15 % de las centrales hidroeléctricas reversibles tiene una capacidad instalada de igual o menor a 80 MW.
- El 50 % de las centrales hidroeléctricas reversibles tiene una capacidad instalada de igual o menor a 350 MW.
- El 85 % de las centrales hidroeléctricas reversibles tiene una capacidad instalada de igual o menor a 1180 MW.



*Ilustración 72. Capacidad instalada de centrales hidroeléctricas reversibles en el mundo.
Fuente: Jiménez (2012)*

Otra característica relevante en este tipo de centrales hidroeléctricas es el salto hidráulico que tiene entre sus embalses. A diferencia de la anterior base de datos (190 centrales), esta comprende 170 centrales. Como se muestra en la Ilustración 73, se obtuvieron las conclusiones:

- El 15 % de las centrales hidroeléctricas reversibles tiene un salto hidráulico igual o menor a 90 metros.
- El 50 % de las centrales hidroeléctricas reversibles tiene un salto hidráulico igual o menor a 280 metros.
- El 85 % de las centrales hidroeléctricas reversibles tiene un salto hidráulico igual o menor a 520 metros.

A estos datos se puede añadir que el salto hidráulico es muy importante para decidir su ubicación, dado que esta característica abarata los precios de la central debido a que los requerimientos de almacenamiento son menores, lo cual influye en el tamaño de los embalses (Jiménez, 2012).

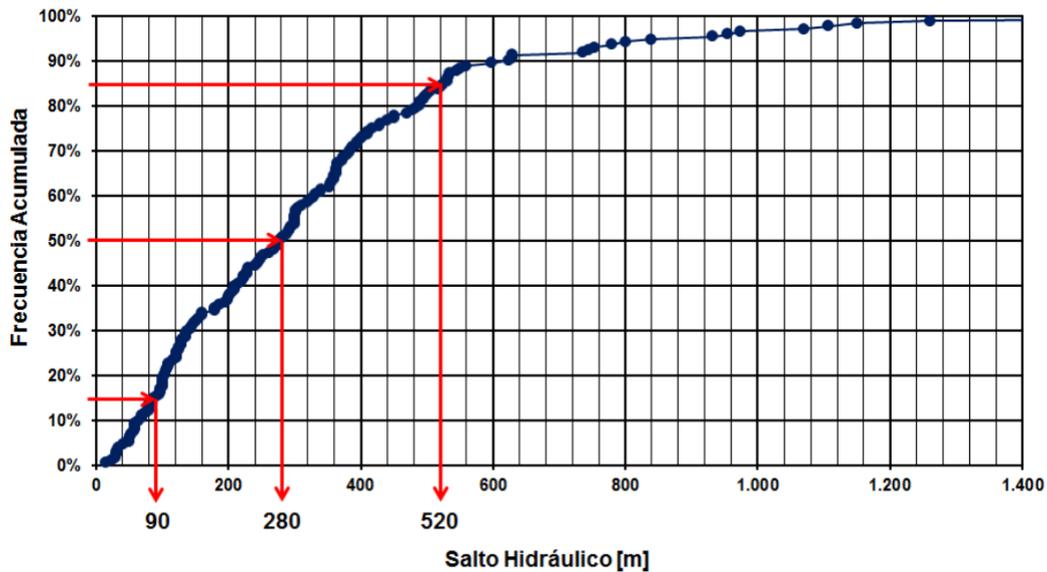


Ilustración 73. Salto hidráulico de centrales hidroeléctricas reversibles en el mundo. Fuente: Jiménez (2012)

Otra característica a destacar es la capacidad de los embalses: superior e inferior. De acuerdo con los datos expuestos en la Ilustración 74, se concluyó lo siguiente:

- El 15 % de las centrales hidroeléctricas reversibles tiene un volumen total de almacenamiento igual o menor a 2 hm³.
- El 50 % de las centrales hidroeléctricas reversibles tiene un volumen total de almacenamiento igual o menor a 15 hm³.
- El 85 % de las centrales hidroeléctricas reversibles tiene un volumen de almacenamiento igual o menor a 200 hm³.

Cabe señalar que esta característica está muy influenciada por la anterior, debido a lo mencionado previamente.

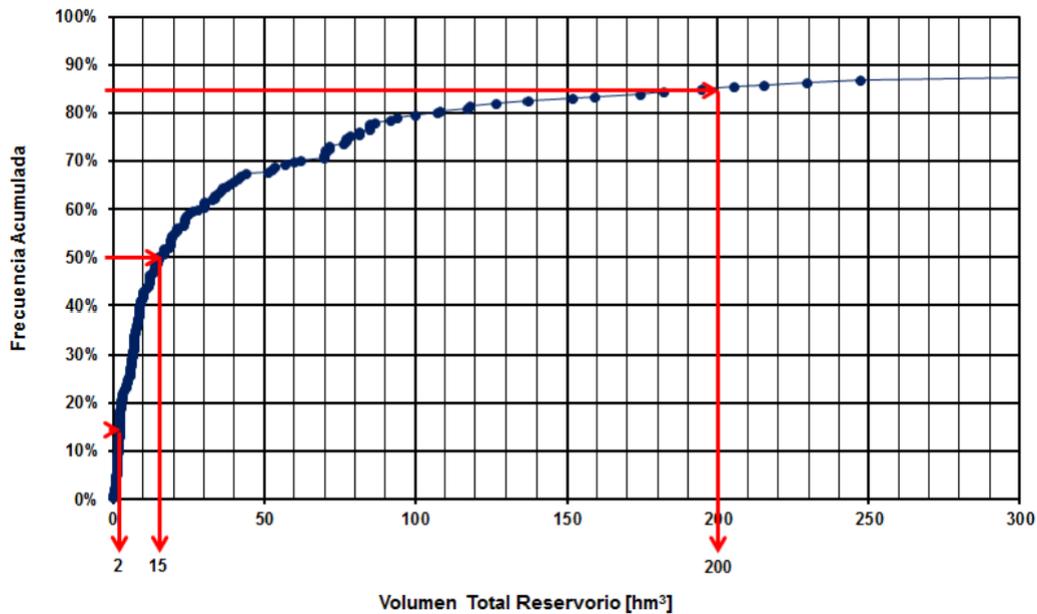


Ilustración 74. Volumen de almacenamiento de centrales hidroeléctricas reversibles en el mundo. Fuente: Jiménez (2012)

Finalmente, en la Ilustración 75 se muestra la relación entre el volumen total de almacenamiento por potencia instalada de las centrales. De esa manera, se concluyó lo siguiente:

- El 20 % de las centrales hidroeléctricas reversibles tienen una relación del volumen total/MW de igual o menor a 0.01 hm³/MW.
- El 50 % de las centrales hidroeléctricas reversibles tienen una relación del volumen total/MW de igual o menor a 0.03 hm³/MW.
- El 80 % de las centrales hidroeléctricas reversibles tienen una relación del volumen total/MW de igual o menor a 0.6 hm³/MW.

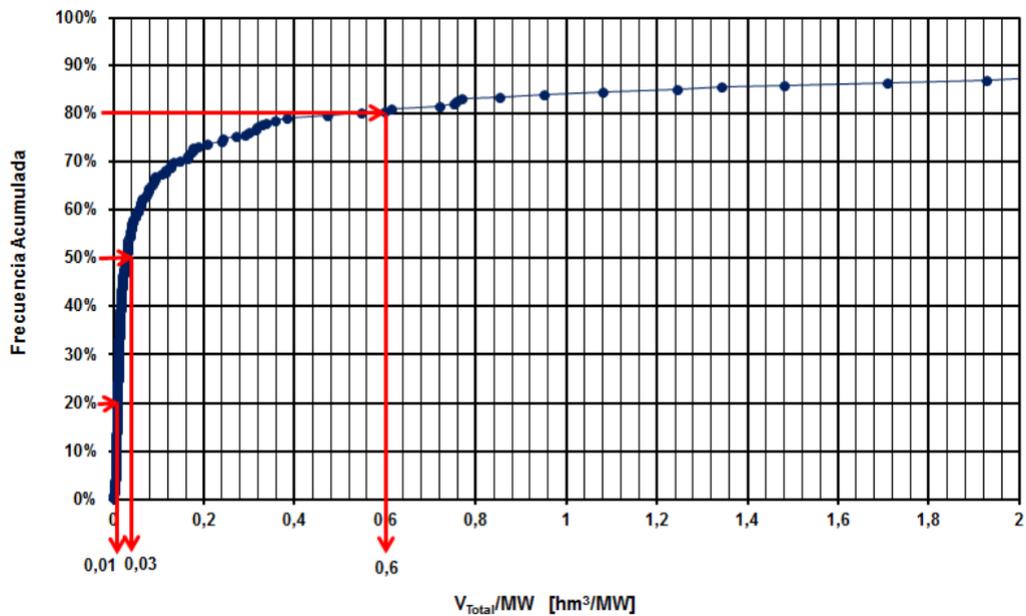


Ilustración 75. Relación volumen/potencia de centrales hidroeléctricas reversibles en el mundo.
Fuente: Jiménez (2012)

3.6.2 Ejemplos

Alrededor del mundo existen muchas centrales de este tipo, cada una con características únicas. A continuación, se presentan algunos ejemplos:

- La central hidroeléctrica reversible Bath County, Estados Unidos.
- La central hidroeléctrica reversible de Grand'Maison, Francia.
- La central hidroeléctrica reversible de Tianhuangping, China.

Central hidroeléctrica Bath County

Actualmente, es la central hidroeléctrica reversible con más potencia instalada en funcionamiento, conocida como la batería más grande del mundo, ubicada en el estado de Virginia en Estados Unidos. La central empezó su construcción en 1977 y entró en operación en el año 1985. Tiene una capacidad de 3003 MW y cuenta con un salto hidráulico de 385 metros. La central posee seis turbinas tipo Francis de 500MW de potencia cada una. Además, cuenta con un volumen de almacenamiento entre los dos reservorios de 81.4 hm³ (ver Ilustración 76).



Ilustración 76. Central hidroeléctrica reversible Bath County. Adaptado de: Google imágenes

El embalse superior tiene una superficie de 1.07 km² y una capacidad de almacenamiento de 43.8 hm³. Durante su funcionamiento, el agua fluctúa aproximadamente 32 metros (ver Ilustración 77).



Ilustración 77. Embalse superior de central hidroeléctrica reversible Bath County. Fuente: Herald Courier (2020)

El embalse inferior cuenta con una superficie de 2.25 km² y una capacidad de almacenamiento de 37.6 hm³. Durante su funcionamiento, el agua fluctúa aproximadamente 18 metros (ver Ilustración 78).



Ilustración 78. Embalse inferior de central hidroeléctrica reversible Bath County. Fuente: Herald Courier (2020)

La central hidroeléctrica reversible de Grand'Maison

La central hidroeléctrica reversible Grand'Maison es la más grande de Francia y las más grande de Europa, esta llegó a suministrar en horas pico hasta 1.8 GW a la red eléctrica de Francia. Está ubicada en los Alpes franceses, en el valle de Romanche. El embalse superior se construyó entre 1978 y 1985, entró en funcionamiento la central completa en el año de 1987. Tiene una capacidad instalada de 1800 MW y cuenta con un salto hidráulico de 955 metros.

La central está dividida en dos: la superficial y la subterránea. La superficial es una central hidroeléctrica convencional, mientras que la subterránea es una central hidroeléctrica reversible. La central superficial cuenta con cuatro turbinas Pelton de 158.5 MW de capacidad cada una, mientras que la central subterránea cuenta con 8 turbinas reversibles tipo Francis de 152.5 MW de capacidad en modo turbina y 157 MW de capacidad en modo bomba. Su conducción principal del embalse superior al inferior se realiza mediante una conducción principal de 7.1 km de largo, además de que cuenta con tres conductos de tuberías de 1.4

km cada una. El volumen total de almacenamiento entre los dos reservorios es de 155 hm³ (ver Ilustración 79).

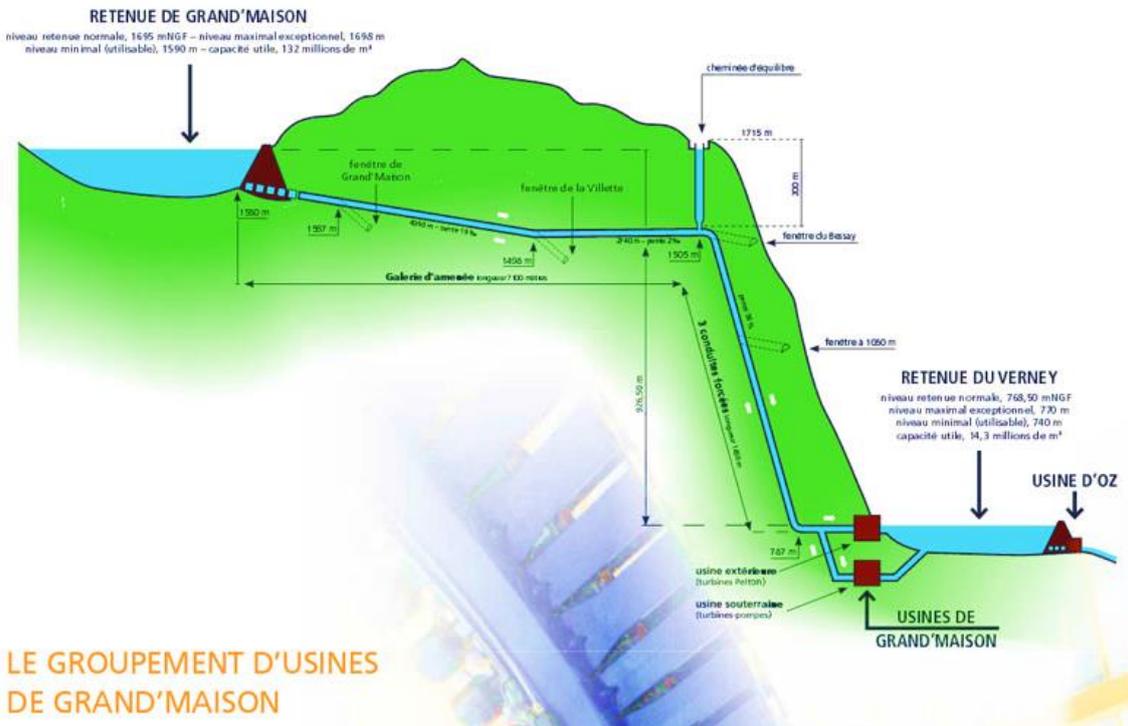


Ilustración 79. Esquemas de central hidroeléctrica reversible de Grand'Maison. Fuente: *Électricité de France (EDF), 2011*

El embalse superior se encuentra a una altura de 1.695 m s. n. m., en el que se encuentra la presa de 160 metros de altura que crea al embalse Lac de Grand'Maison, esta cuenta con una capacidad de almacenamiento de 140 hm³. El embalse inferior Lac du Verney, ubicado a 770 m s. n. m., cuenta con un almacenamiento total de 15 hm³. Cabe aclarar que este embalse es artificial (ver ilustraciones 80 y 81).



Ilustración 80. Embalse superior de central hidroeléctrica reversible Grand'Maison. Fuente: NS Energy



Ilustración 81. Embalse inferior de central hidroeléctrica reversible Grand'Maison. Fuente: NS Energy

La central hidroeléctrica reversible de Tianhuangping

La central hidroeléctrica reversible de Tianhuangping se encuentra ubicada en la provincia de Zhejiang, China. Comenzó su construcción en 1993, la cual terminó y empezó su funcionamiento en 2004. Tiene una capacidad instalada de 1800 MW y tiene un salto hidráulico de 560 metros. La central cuenta con seis turbinas reversibles tipo Francis, con capacidad de 300 MW cada una. La casa de máquinas en esta central es subterránea y cuenta con una tubería forzada de 882 metros de longitud y, antes de llegar a las turbinas, se divide en seis ramales que alimentan a cada turbina. Entre los dos embalses, cuenta con una capacidad de almacenamiento igual a 13.5 hm³.

El embalse superior cuenta con una capacidad de almacenamiento de 6.76 hm³, el cual se excavó en parte de la montaña y se revistió de hormigón, por lo que se considera un embalse artificial (ver Ilustración 82).



Ilustración 82. Embalse superior de la central hidroeléctrica reversible de Tianhuangping.

Fuente: Sky Blue

El embalse inferior se creó mediante la presa que lleva el mismo nombre. La presa de Tianhuangping es del tipo escollera, tiene 72 metros de altura y 577 metros de largo. El embalse tiene una capacidad de almacenamiento de 6.77 hm³ (ver Ilustración 83).



Ilustración 83. Embalse inferior de la central hidroeléctrica reversible de Tianhuangping.

Fuente: Power Technology (2002)

CAPÍTULO 4: PROPUESTA DE CENTRAL HIDROELÉCTRICA REVERSIBLE PARA EL PROYECTO HIDROPAUTE

Si bien ya se explicó el uso original de este tipo de centrales, en este capítulo se propuso adaptar la idea original del uso de este tipo de centrales para Ecuador y su caso de desertificación estacional. Dado a conocer el objetivo de este tipo de central para el trabajo presentado y las características importantes de las centrales hidroeléctricas reversibles, con énfasis en la capacidad de satisfacer el déficit energético en la temporada de estiaje, a continuación se presentan las propuestas de las centrales hidroeléctricas reversibles, con las siguientes factores considerados.

4.1 Factores a considerar

En su investigación, Jiménez (2012) mencionó los factores para la elección del emplazamiento de la propuesta, los cuales engloban los aspectos técnicos y económicos de las centrales hidroeléctricas reversibles, estos son:

- Factores generales asociados al sistema eléctrico.
- Factores relacionados con el emplazamiento de la central.
- Factores económicos asociados al sistema eléctrico.

4.1.1 Factores generales asociados al sistema eléctrico

Excedente energético

Este factor está estrechamente relacionado con la existencia de excedentes energéticos, puesto que una de las principales características de las centrales hidroeléctricas reversibles consiste en el almacenamiento de energía excedente en forma de agua. Esto se realiza mediante el almacenamiento de agua excedente en la temporada de lluvia a través del bombeo del reservorio inferior al superior, para luego usar este mismo excedente y, de esa manera, satisfacer la demanda energética en la temporada de estiaje.

El excedente energético, producto del gran caudal que fluye en esos momentos, puede emplearse para el bombeo de agua del embalse inferior al superior; sin embargo, se puede utilizar el excedente energético de otras fuentes, por lo que se da pie a la inclusión de otras fuentes de energía: la energía eólica y la solar. Un caso particular sería emplear la energía solar en el día para almacenar

excedente de agua mediante el bombeo de este mismo y, por las noches, hacer uso de la energía eólica para el bombeo del excedente (Jiménez, 2012).

4.1.2 Factores relacionados con el emplazamiento de la central

Para la evaluación del lugar de emplazamiento, se siguieron las recomendaciones de la USACE (1985, como se citó en Jiménez, 2012). Con base en criterios económicos y técnicos, se recomienda lo siguiente:

- El salto hidráulico debe ser lo mayor posible: esto está asociado al volumen de almacenamiento debido a que es inversamente proporcional, es decir, el salto hidráulico condiciona el volumen a almacenar del embalse superior especialmente (ver Ilustración 84).

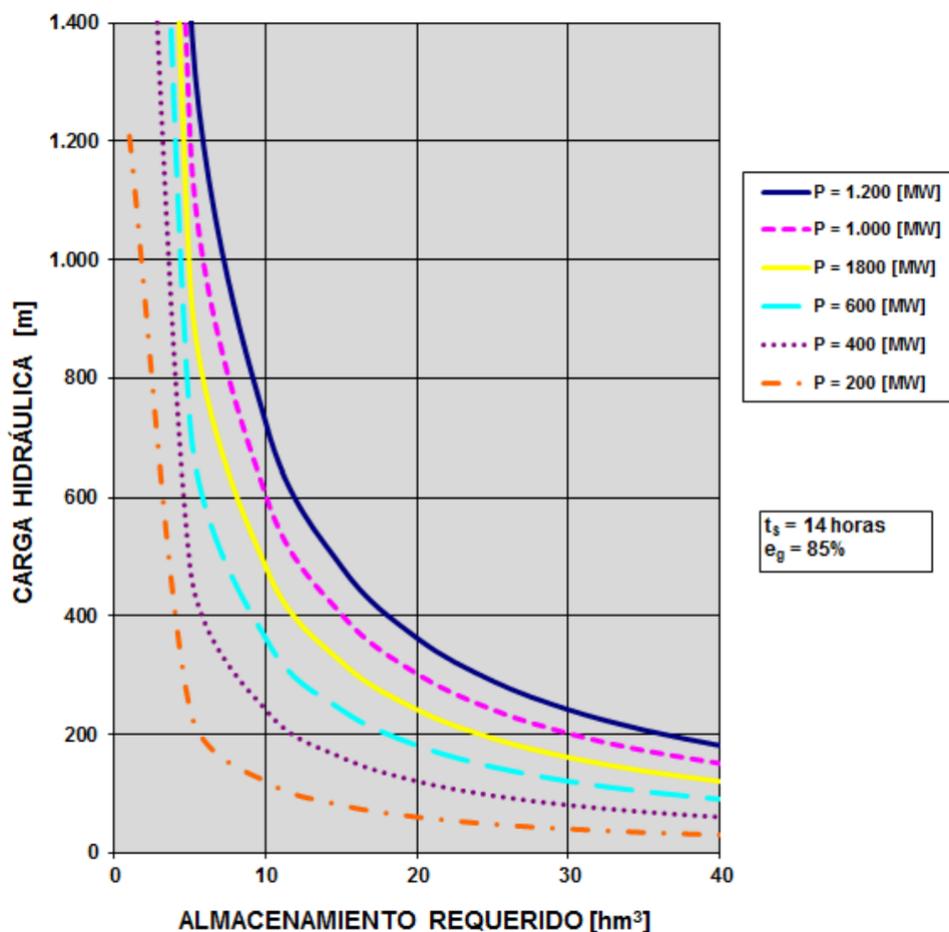


Ilustración 84. Curva de almacenamiento requerido según la carga hidráulica para distintas potencias de centrales. Fuente: Jiménez (2012)

Un ejemplo de centrales hidroeléctricas reversibles con gran salto hidráulico es la central Piastra Edolo, que posee un salto hidráulico de 1260 metros. Por ello, una de sus características es tener un embalse de

1.3 hm³ aproximadamente, el cual es muy bajo en comparación con otras centrales reversibles en el mundo (Jiménez, 2012) (ver Ilustración 85).

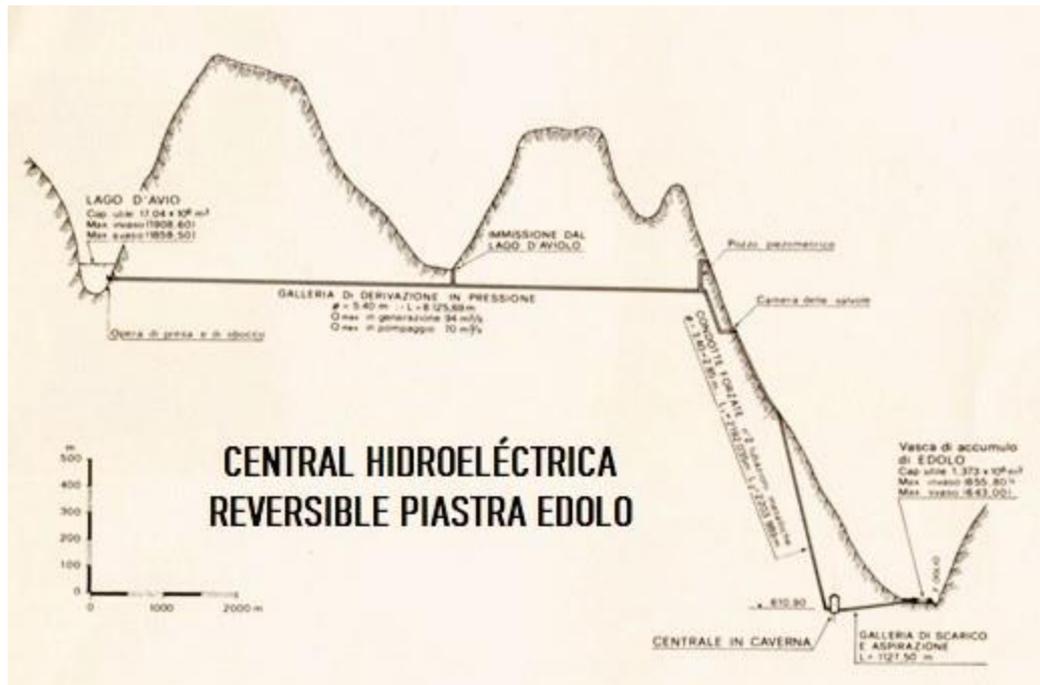


Ilustración 85. Esquema de central hidroeléctrica reversible Piastra Edolo, Italia. Adaptado de: Google Imágenes

- Condiciones geológicas adecuadas para la instalación de los depósitos de agua: esto se relaciona con temas constructivos, debido a la decisión de la ubicación de las tuberías. Estas pueden ser superficiales o subterráneas. Lo recomendado es que la conducción y el cuarto de máquinas de las centrales con L/H bajo sean subterráneos; en cambio, para las centrales con L/H alto se recomienda conducción superficial o casi superficial y cuarto de máquinas superficial. Esta decisión finalmente es tomada en cuenta según la parte económica, mas no el lado técnico; sin embargo, también se consideran los aspectos negativos que afecten a futuro en decisión, como lo es la cavitación en tuberías y turbinas.
- La distancia entre embalses debe de ser lo más cercana posible: según la USACE (1985, como se citó en Jiménez, 2012), se recomienda emplear una relación L/H, el cual L es la longitud de las tuberías entre embalses y H la carga hidráulica. La máxima relación L/H aceptada es de 10 a 12 para proyecto de gran carga hidráulica; en c para carga hidráulica bajas, se recomienda una relación entre 4 y 5. A nivel económico, este factor es

esencial en obras con carga hidráulica baja, ya que es común encontrar grandes diámetros en este tipo de obras.

- Buena disponibilidad del recurso hídrico: este factor está relacionado con el excedente energético, además de pensar en el buen funcionamiento de la central. También está enfocado en las pérdidas de recurso en los reservorios y la conducción, por lo que es necesario tener una fuente confiable que ayude a contrarrestar estas pérdidas, esto en el caso de que sea un sistema cerrado. Lo anterior, a diferencia de si uno de los embalses es alimentado por un cuerpo de agua, dado que este lo repondrá por las pérdidas que ha sufrido el otro embalse por distintos factores como la evaporación.
- Emplear depósitos existentes: esto permite disminuir costos en la construcción de las centrales reversibles, especialmente si el depósito existente es alimentado por un cuerpo de agua o simplemente es un cauce natural. También se suele emplear lagunas, pero a diferencia de la anterior opción, este suele traer consigo arduos estudios de impacto ambiental debido a sus múltiples usos. Una recomendación sería emplear estas lagunas y adecuarlas para que se conviertan en embalses multipropósitos y, de esa manera, disminuir el impacto ambiental de este (Jiménez, 2012).
- Ubicación cercana a líneas de transmisión: la ubicación cercana a las líneas de distribución o a una central base aumenta la efectividad de este tipo de centrales, dado que su cercanía disminuye costos de transporte de energía durante etapas de bombeo y turbinado (Jiménez, 2012). Esto también va relacionado con las cercanías con otras fuentes de energía como la eólica o solar, puesto que así se aprovecharían las fluctuaciones de estas fuentes según la demanda, para emplear la energía excedente en bombear agua.

4.1.3 Factores económicos asociados al sistema eléctrico

Este factor está estrechamente relacionado con el costo que representa bombear el agua hacia los reservorios en horas de baja demanda en las temporadas de lluvia y la ganancia del turbinado del agua en la temporada de estiaje. La turbinación del agua en la temporada de estiaje representa una

generación energética a mayor precio, es decir, la central tendrá mayores ingresos a la hora de turbinar. Por ello, se busca bombear el agua en la temporada de lluvia, para que así el costo sea bajo y la operación de la central hidroeléctrica reversible signifique una ganancia.

Este factor es muy importante a la hora de evaluar la construcción de una central de este tipo. En este caso, se evalúan modelos hidrológicos que puedan predecir cómo será la disponibilidad del recurso en el futuro. También se analizan las variaciones de precios energéticos en horas de alta demanda y de baja demanda. Para el caso de estudio, serían las variaciones de precios por temporadas.

Este último punto se visualiza en la Ilustración 86, donde también se observa la variación mensual del precio medio por cada kWh. Asimismo, se constata el aumento de los precios en la temporada de estiajes y la contraparte en la temporada de lluvia, cuyo precio tiende a bajar. Por otra parte, las variaciones diarias deben ser iguales que todas las centrales en el mundo, es decir, la alta demanda por el día y la baja demanda por la noche.

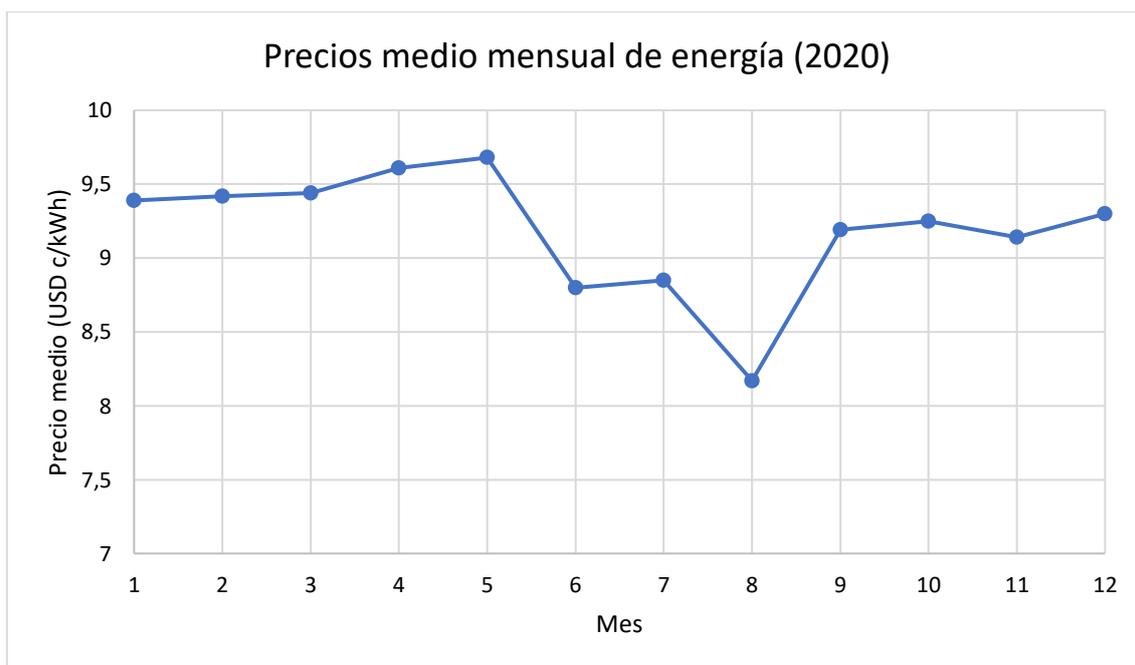


Ilustración 86. Precio medio mensual de energía facturada en Ecuador en el año 2020. Fuente: Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables (2021)

4.2 Propuesta

Propuesta 1

La propuesta número uno se encuentra ubicada en los límites de la provincia de Azuay, muy cerca de las centrales hidroeléctricas Mazar y Molino. Se consideró el embalse Mazar, como el embalse inferior, y se planteó un embalse artificial que actúe como el embalse superior, característico de este tipo de centrales (ver Ilustración 87).

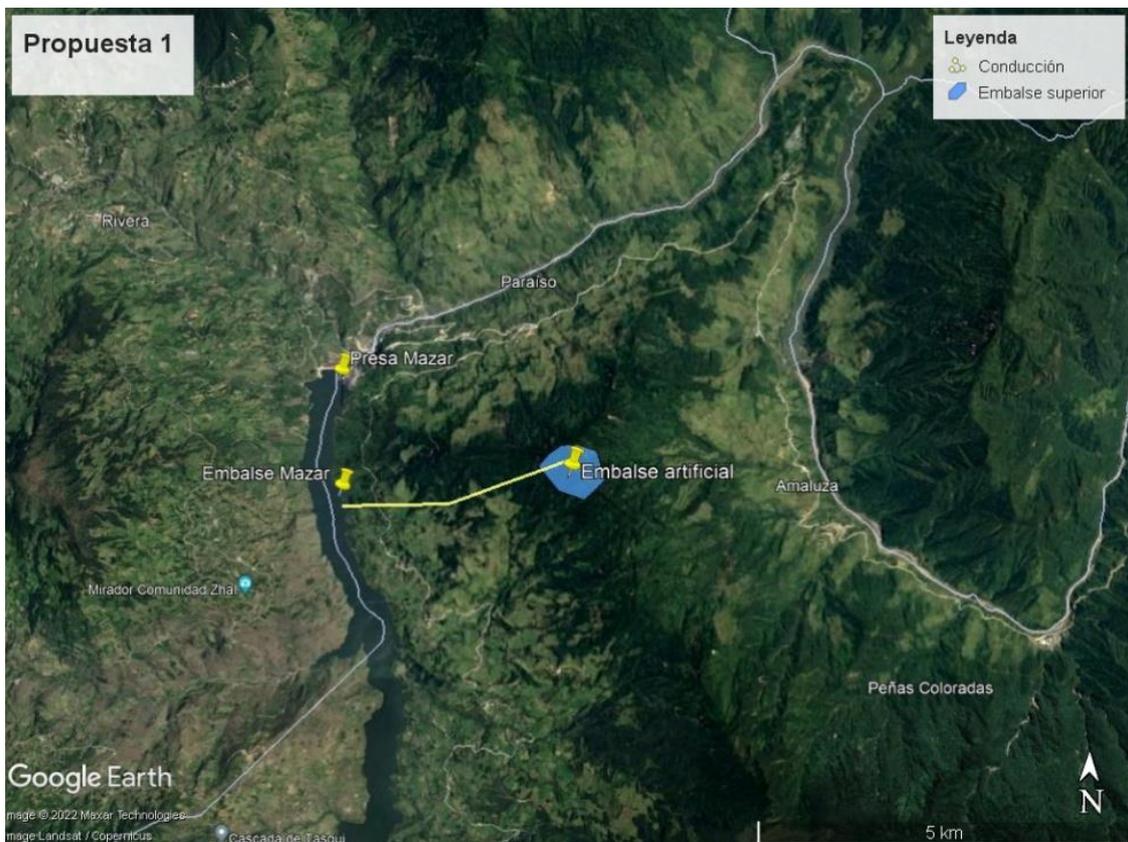


Ilustración 87. Propuesta 1 de central hidroeléctrica reversible. Fuente: autor. Adaptado de: Google Earth

La central hidroeléctrica reversible propuesta aprovecharía la existencia de un embalse ya existente como embalse inferior, tal como lo hace Mazar. Además, se emplearían los excedentes energéticos existentes en la central Mazar que ocurren en las temporadas de lluvias de la región, los cuales se reflejan en los informes de Hidropaute. Al emplear el embalse Mazar también se está aprovechando el recurso natural que ofrece el río Paute, así como la cercanía con esta. La cercanía de la central hidroeléctrica Mazar también ofrecería la disponibilidad de uso de las líneas de conexión energéticas.

Por la parte del embalse superior, se propone un embalse artificial en la parte superior de la montaña que da forma al río Paute. Para la propuesta del embalse superior se tomó como referencia el embalse artificial construido para la central hidroeléctrica reversible de Tianhuangping, China.

Se calculó un volumen aproximado de almacenamiento del embalse superior con la ayuda del software Google Earth, y se siguió los factores previamente mencionados. Para el valor propuesto se tomó en consideración su topografía, esto es, 1,4 millones de metros cúbicos aproximadamente. El valor del volumen de almacenamiento está sujeto a cambios, debido a que, según su diseño, este valor tiende a variar, lo que afecta a la capacidad de almacenamiento, la cual es mayor o menor. El valor del salto hidráulico entre los dos embalses es de más de 1 kilómetro, el cual refuerza la propuesta de embalse superior y su volumen propuesto.

En el caso de las tuberías de conducción, se propone que estas se ubiquen a una profundidad moderada. Esta conducción tendrá una longitud aproximada de 3.2 km, lo que significaría una distancia muy cercana en comparación con otros ejemplos de este tipo de central hidroeléctrica. Además, se plantea el uso de una bomba hidráulica reversible y máquinas individuales, es decir, la bomba y una turbina (ver Ilustración 88).

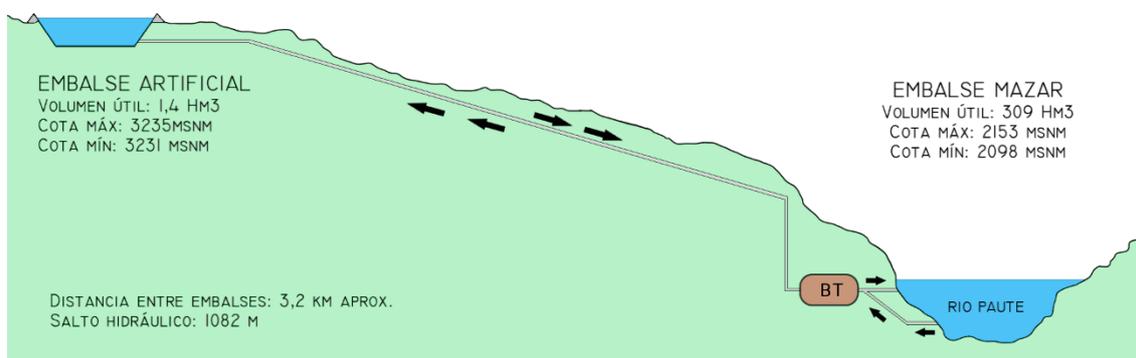


Ilustración 88. Esquema de propuesta 1 de central hidroeléctrica reversible. Fuente: autor

Otra opción es colocar las tuberías de conducción de manera superficial, con el fin de evitar, en gran medida, los trabajos de excavaciones. De esa forma, los trabajos quedarían limitados a cortes y rellenos para la mayor linealidad de las tuberías (ver Ilustración 89).

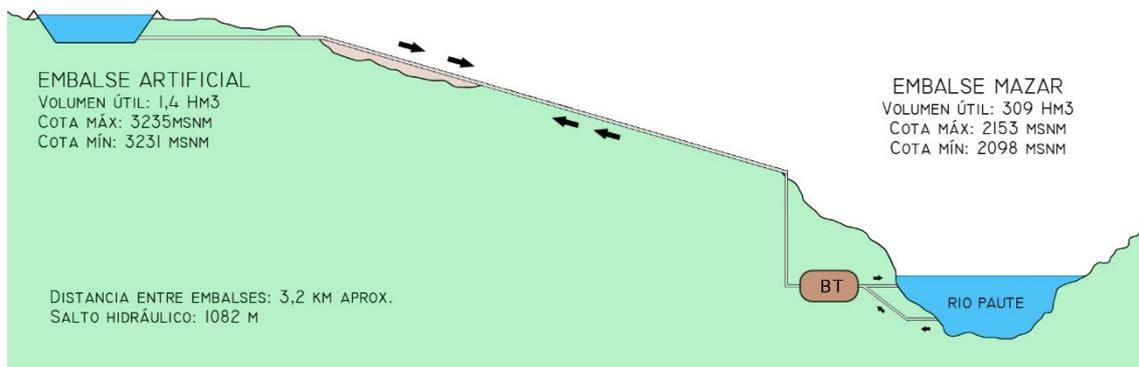


Ilustración 89. Esquema de propuesta 1 de central hidroeléctrica reversible con conducción superficial. Fuente: autor

Un detalle a destacar son los anclajes de las tuberías mediante la técnica de *soil nailing*, de manera que exista un buen anclaje con la roca, lo que evitaría molestias en las tuberías cuando entre en funcionamiento (ver Ilustración 90).

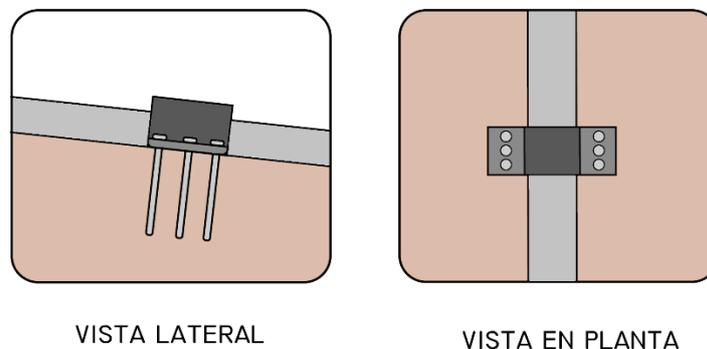
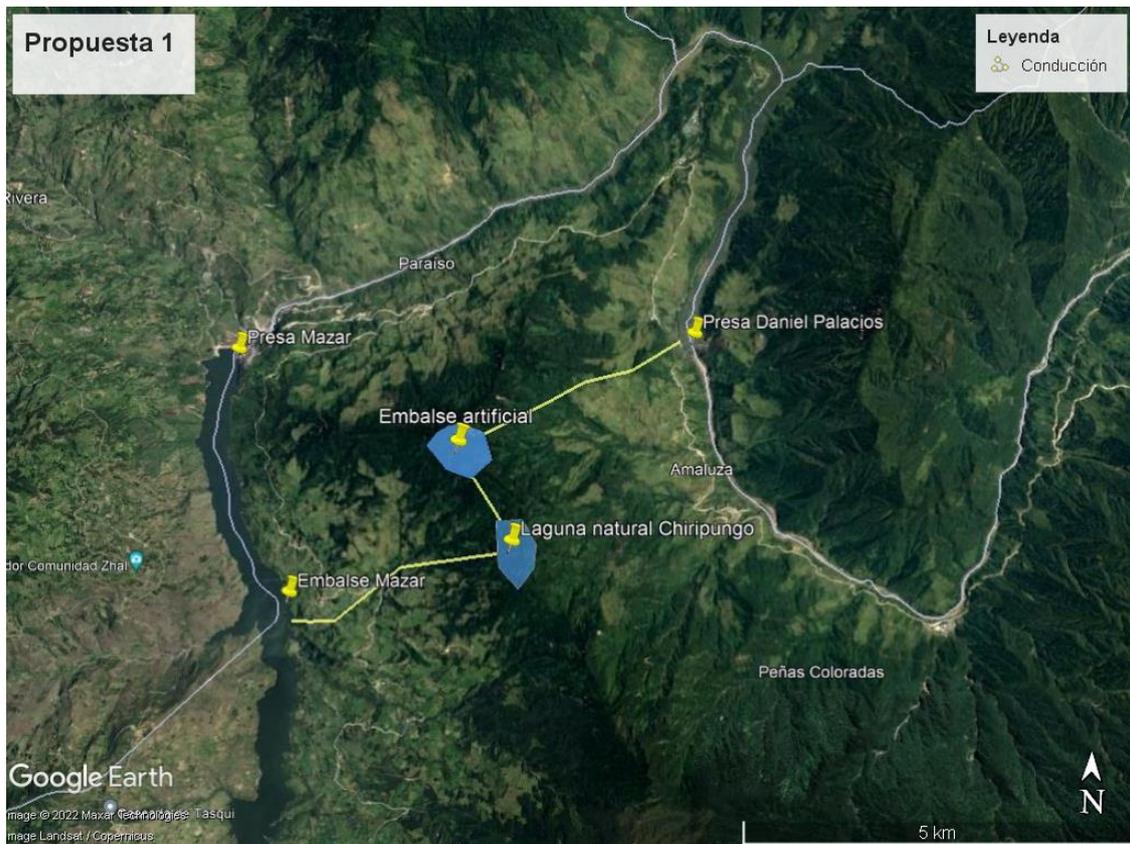


Ilustración 90. Esquema de anclaje de las tuberías sobre roca. Fuente: Autor

Variante

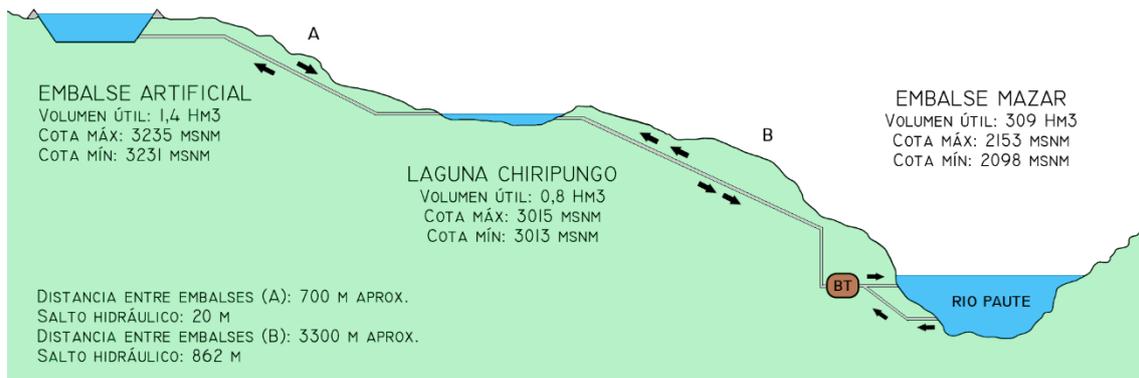
Se propone una variación de la propuesta 1, la cual consiste en sumar una laguna natural cercana al sistema de embalses, como se observa en la Ilustración 91. Cabe acotar que, en esta propuesta, como se observa en la ilustración, también existe la posibilidad de conectarse al embalse Amaluza, perteneciente a la central Paute-Molino, gracias a la topografía del embalse artificial.



*Ilustración 91. Variante de la propuesta 1 de central hidroeléctrica reversible. Fuente: autor.
Adaptado de: Google Earth*

La propuesta varía, puesto que se suma un embalse más que sería la laguna Chiripungo y que estaría conectado al embalse artificial mediante vasos comunicantes. Esta implementación aumentaría el volumen de almacenamiento, que mediante Google Earth se pudo estimar que sería de 0.8 millones de m³; sin embargo, la laguna se puede adaptar para que pueda almacenar más agua.

La capacidad de almacenamiento entre los dos embalses sumaría 2.2 millones de metros cúbicos, sin contar la capacidad de expandir el almacenamiento de la laguna. Esto permitiría un mayor almacenamiento de agua en las temporadas de estiaje. Otro cambio sería de la longitud de la conexión, dado que esta aumentaría a 4 km aproximadamente. En temas de las máquinas de bombeo y turbinas, se seguiría usando la bomba hidráulica reversible. Lo anterior, implementaría una bomba extra para subir el agua de la laguna al embalse artificial. Esto causaría un descenso del salto hidráulico, pero aun así seguiría siendo un salto hidráulico alto en comparación con los estándares de las centrales reversibles en el mundo (ver Ilustración 92).



*Ilustración 92. Esquema de la variante de la propuesta 1 de central hidroeléctrica reversible.
Fuente: autor*

A continuación, en la Ilustración 93 se muestra la variante de la propuesta 1 con conducción superficial.



Ilustración 93. Esquema de variante de la propuesta 1 de la central hidroeléctrica reversible con conducción superficial. Fuente: autor

Propuesta 2

La propuesta número dos se encuentra ubicada entre la provincia de Cañar y la provincia de Azuay. Al igual que en la propuesta anterior, se plantea usar el embalse Mazar como embalse inferior, mientras que el embalse superior sería un embalse artificial en una zona montañosa cerca de la parroquia Pindilig, Cañar (ver Ilustración 94).

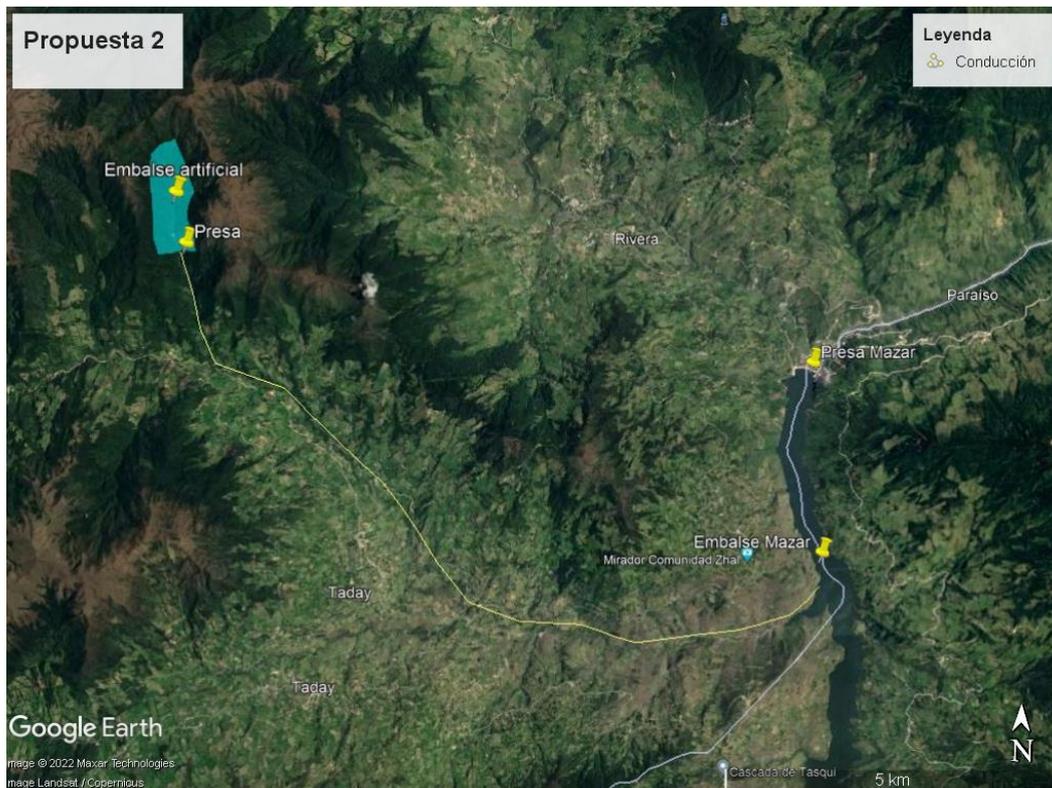


Ilustración 94. Propuesta 2 de central hidroeléctrica reversible. Fuente: autor. Adaptado de: Google Earth

La central hidroeléctrica reversible propuesta aprovecharía la presencia cercana del embalse Mazar y el excedente que esta tiene en la temporada de lluvia para su funcionamiento. En este caso, se tomaron varios factores como referencia para su ubicación, como la cercanía de un embalse existente y la cercanía de conexiones energéticas ofrecidas por la central hidroeléctrica Paute-Mazar.

Si bien el embalse inferior es el mismo de la propuesta número uno, la diferencia es su embalse superior que, en este caso, sería de mayor volumen de almacenamiento, además de contar con una presa, ya sea de gravedad o de arco. Con la ayuda de Google Earth, se pudo estimar un volumen de almacenamiento de 20 millones de metros cúbicos; sin embargo, este volumen estará sujeto a la altura de la presa.

El embalse tendrá una capacidad notable, por lo que será mucho más eficiente para el almacenamiento de agua en temporadas de estiaje. No obstante, este también puede emplearse para otros usos en beneficio de las comunidades cercanas, por lo que se consideraría un embalse multipropósito. El salto hidráulico entre los dos embalses es de aproximadamente 900 metros. Si bien el

salto hidráulico es menor que la anterior propuesta, el volumen de almacenamiento de esta propuesta es mucho mayor que la anterior.

La conducción de esta propuesta es de aproximadamente 13 km, si bien la distancia ha aumentado considerablemente, el almacenamiento también. Cabe mencionar que la ruta que tomó la conducción del agua se planteó de acuerdo con la topografía, para que exista la caída por gravedad, además de no tener que excavar a una profundidad destacable para la colocación de las tuberías. En el caso de que no exista impedimento constructivo para que las tuberías vayan a una profundidad considerable, la longitud de la tubería pudiese tomar otra ruta, lo que acortaría considerablemente la distancia entre los embalses. Las máquinas a emplear son las mismas de la primera propuesta, esto es, el uso de una bomba turbina reversible. Aun así, también se considera el uso de las máquinas individuales, es decir, la bomba y la turbina (ver Ilustración 95).

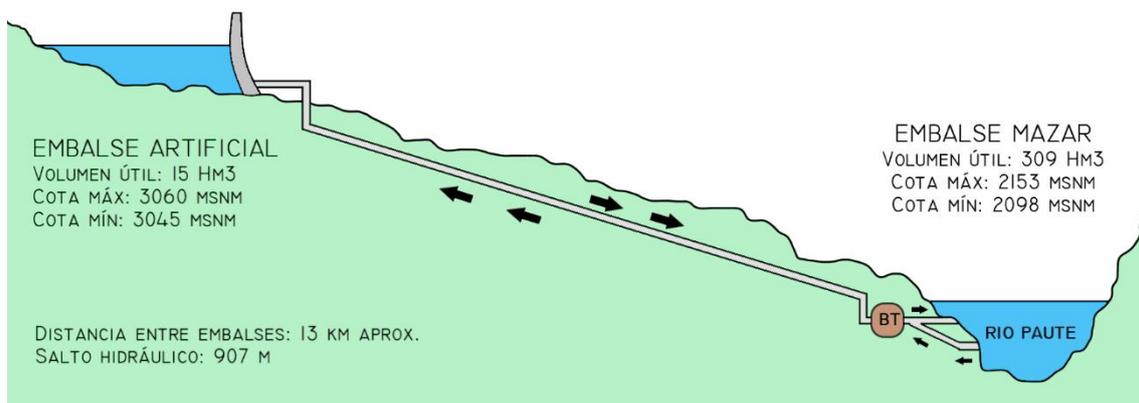


Ilustración 95. Esquema de propuesta 2 de central hidroeléctrica reversible. Fuente: autor

Otra opción consiste en ubicar las tuberías de manera superficial, como se muestra en la Ilustración 96.

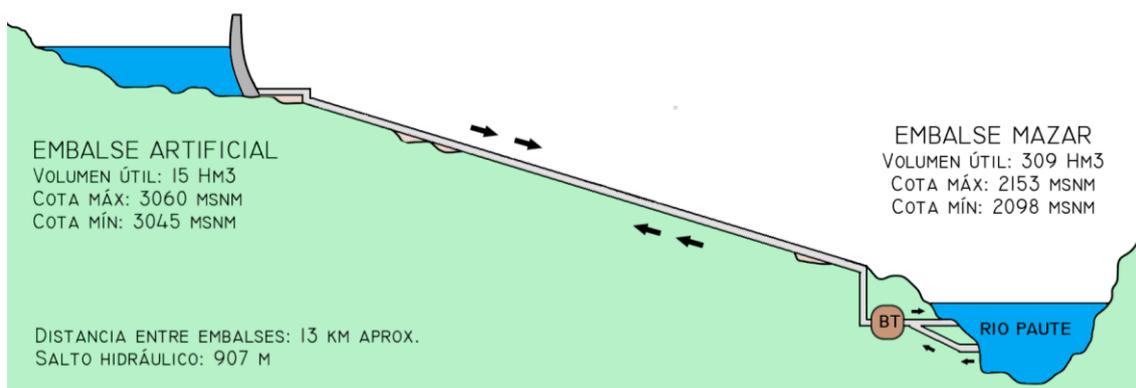


Ilustración 96. Esquema de propuesta 2 de la central hidroeléctrica reversible con conducción superficial. Fuente: autor

Bomba turbina reversible

Las bombas turbina son una parte fundamental de la propuesta, a continuación se explica un poco el funcionamiento para el proyecto. El modo bomba funcionará cuando exista excedente energético, cuando el recurso sea abundante, justamente en temporada de lluvias de la región. En el caso del modo turbina, se empleará cuando sea necesario regular la generación energética para la satisfacción de la demanda, concretamente en la temporada de estiaje (ver Ilustración 97).

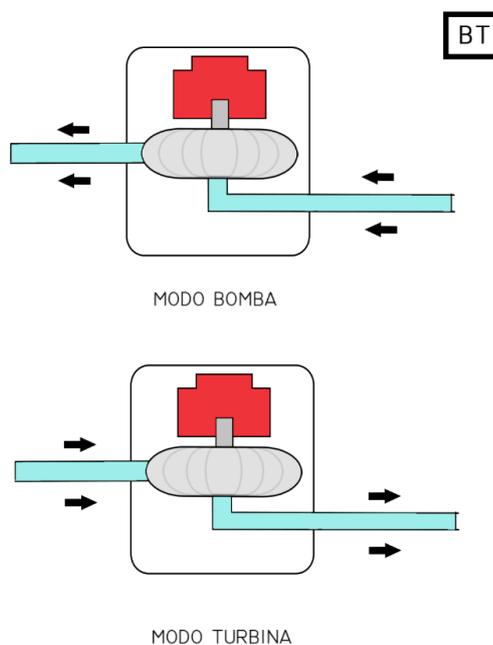


Ilustración 97. Esquema del funcionamiento de una bomba turbina reversible. Fuente: autor

Las bombas turbina a emplear son las bombas de flujo radial en serie o multietapa, debido a las grandes diferencias de alturas de las propuestas, lo que permitiría alcanzar dicha altura. Además, en caso de que sea necesario, se tiene también previsto el uso de bombas de flujo doble o puestas en paralelo, para así aumentar la capacidad de bombeo. De esta forma, se emplearían bombas de flujo radial doble en serie (ver Ilustración 98).

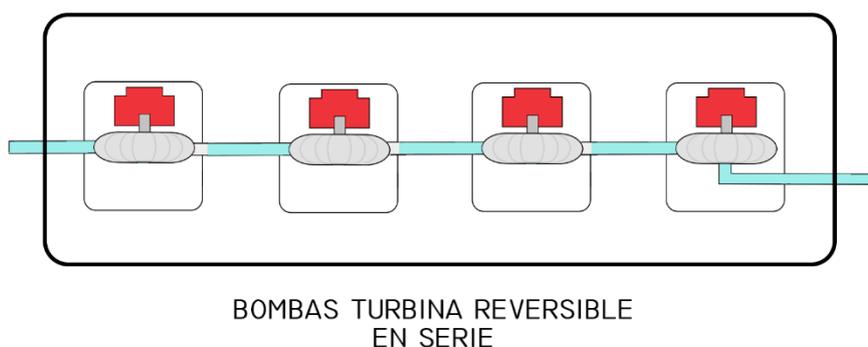


Ilustración 98. Esquema del funcionamiento de bombas turbina reversibles en serie. Fuente: autor

Integración con otras fuentes de energía

Un punto en común que se propone en las dos opciones es la de integrar otras fuentes de energía, como la solar o la eólica, e incluso las dos a la vez. Esta propuesta es reforzada por la bibliografía que menciona a Azuay como provincia potencialmente generadora de estas dos fuentes de energía, además de la literatura expuesta en apartados anteriores. Estas fuentes pueden considerarse secundarias, dado que contribuirían con la energía requerida para el bombeo, además de aportar a la central principal cercana. En caso de implementarse, ya no se requeriría la energía de la central cercana para el bombeo del agua, de manera que la central hidroeléctrica reversible trabajaría de forma independiente cuando se necesite bombear agua y tan solo aportaría energía a la central hidroeléctrica cercana, en este caso, la central Mazar.

De todas formas, el ciclo de bombeo de las centrales hidroeléctricas reversibles son factibles, debido a los momentos en que se realizan estas acciones. Además, con estas implementaciones se optimizaría el funcionamiento de las centrales y el recurso principalmente.

4.2 Beneficios

Una vez presentadas las propuestas, las características y los aspectos a considerar al proponer la central, en este apartado se indican los beneficios relacionados con el funcionamiento de las centrales hidroeléctricas reversibles para el país.

Beneficios técnicos

Como se mencionó previamente, las centrales hidroeléctricas traen consigo varios beneficios en el apartado técnico de una red energética, como lo es la regulación de la frecuencia y la nivelación de carga, y se recalca la generación energética en temporada de estiaje como pieza fundamental de los beneficios. Adoptando estos conceptos al caso de estudio, se puede mencionar que el complejo hidroeléctrico Paute-Integral saldrá beneficiado.

Por parte en los beneficios, uno de los más relevantes es la generación energética, es decir, la central hidroeléctrica reversible ayudará con la producción energética del complejo Paute-Integral, específicamente en la central Mazar. Esta ayuda será principalmente cuando el recurso no permita producir la demanda energética esperada en el momento, específicamente en la temporada de estiajes.

Uno de los beneficios intrínsecos de la implementación de las centrales hidroeléctricas reversibles es la optimización del recurso. La optimización del recurso ocurre en los momentos de abundancia del agua, tanto que la presa del complejo Paute se ve obligada a abrir compuertas para garantizar el desalojo del agua de los embalses.

Beneficios económicos

En el aspecto económico también supone beneficios, debido a que las centrales hidroeléctricas reversibles reemplazarían a las centrales termoeléctricas en las funciones como la de suplir la demanda energética en la temporada de estiaje. El beneficio económico se ve reflejado en el ahorro de dinero, dado que las centrales termoeléctricas representan un gasto de varios millones de dólares anuales para el país, como se evidenció en apartados anteriores. Cabe señalar

que este gasto solo corresponde a la compra de combustibles fósiles necesarios para el funcionamiento de la central termoeléctrica.

El beneficio económico puede aumentar si se incluyen otros factores como, por ejemplo, el mantenimiento de las centrales termoeléctricas. Esto va relacionado con los beneficios técnicos, puesto que, al reemplazar las centrales termoeléctricas por las centrales hidroeléctricas reversibles, se provocaría un descenso en tiempo de funcionamiento de las termoeléctricas, lo que se traduciría en menor cantidad de trabajos de mantenimiento ejecutada.

Beneficios ambientales

Uno de los beneficios más importantes para el país y sus habitantes tiene que ver con el aspecto ambiental. En este escenario, las centrales hidroeléctricas reversibles contribuyen a la producción energética como una con fuente renovable. Esto sería un punto muy importante y positivo en la lucha contra el cambio climático y reforzaría la responsabilidad ecológica de país.

Si bien Ecuador tiene un gran porcentaje de la producción energética mediante fuentes renovables, aún sigue empleando las fuentes no renovables, como se vio reflejado en la tabla de consumo de combustibles de las centrales termoeléctricas y de las más de 1500 toneladas de CO² emitidas en tan solo el año 2020 por concepto de producción energética. Esto se traduciría en contaminación ambiental, la cual se ve potenciada en la temporada de estiajes especialmente, debido al aumento de producción de este tipo de centrales.

Las centrales hidroeléctricas reversibles aportarían a que el porcentaje de producción energética con recursos renovables siga creciendo. Esto tendría efecto inmediato en la disminución del porcentaje de producción energética con recursos no renovables por razones previamente mencionadas. Finalmente, otro aspecto positivo que generaría sería imagen del país frente al mundo, dado que podría ser tomado como referencia mundial, con énfasis en el cambio de la matriz energética y cómo sigue cambiando para ser completamente sustentable energéticamente.

CONCLUSIONES

Fue realizado un levantamiento bibliográfico global sobre sistemas con centrales hidroeléctricas reversibles o por bombeo. Se analizaron las principales características técnicas y los parámetros que deberá ser considerados, para que se puedan construir estas centrales de acumulación de energía, como probable solución de apoyo en las hidroeléctricas de la provincia del Azuay, Ecuador. A partir de aquí se plantea una alternativa posible para abordar la nueva situación de estiaje existente en algunas zonas de la provincia del Azuay, propensas a desertificación por cambio climático, y que están afectando la producción de energía eléctrica en el país.

Fueron analizadas las cifras de la realidad energética ecuatoriana actual a partir del uso de datos oficiales, en donde se hace énfasis en la capacidad instalada actualmente por las centrales hidroeléctricas del país, la generación ecuatoriana a partir de energías renovables, la generación ecuatoriana por combustibles fósiles y la generación por la quema del bagazo de la caña de azúcar. Se realizó un análisis comparativo que incluyó la importación y exportación de energía eléctrica a los países vecinos para el último periodo. Esto permitió estudiar la posibilidad de utilizar centrales hidroeléctricas reversibles para reemplazar la producción de energía mediante el uso de termoeléctricas.

En el presente estudio se plantean tres alternativas para la construcción de centrales hidroeléctricas reversibles o por bombeo para la provincia del Azuay, de manera esquemática. En principio estas centrales van a reducir de manera significativa la reducción de los caudales del río Paute en la temporada de estiaje, y permitirán almacenar energía durante la temporada de lluvias de manera eficiente. El sector de las presas de Mazar y Paute, permiten la construcción de centrales reversibles adicionales a las propuestas en el presente estudio, lo que podría mejorar aún más la producción energética en la temporada de estiaje en Azuay.

Esta propuesta con centrales hidroeléctricas reversibles mejoraría los efectos ambientales provocados por la quema de combustible con termoeléctricas y los gastos económicos por el uso de combustibles. De acuerdo con los datos de la producción anual de las centrales hidroeléctricas del complejo Paute-Integral, las

centrales reversibles mejorarían la producción en esta temporada, donde se reduce el número de turbinas en funcionamiento durante el estiaje.

El autor de la presente investigación considera que las centrales hidroeléctricas reversibles propuestas, ayudarían a tener una producción nacional constante, se dejaría de depender de las centrales termoeléctricas y compras internacionales de energía. Además se impulsaría el desarrollo del país con mejor conciencia ecológica. El país mejoraría sus índices de sustentabilidad.

RECOMENDACIONES

Esta propuesta debería continuar estudiándose. Este modelo de centrales hidroeléctricas reversibles podría instalarse en otras centrales hidroeléctricas del país, además de las centrales hidroeléctricas del sistema Hidropaute, y podría solucionar el problema de la producción no constante que sufren algunas hidroeléctricas debido a la baja de caudales en los ríos, como consecuencia de la temporada de estiaje, los efectos negativos producto del cambio climático que afecta actualmente a Ecuador y otros efectos sociales previstos para el futuro.

REFERENCIAS

- Adetunji, J. (2013). Pumped Hydro Energy Storage-Making Better use of Wind. *The Conversation*.
- Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables. (2021). *Estadística Anual y Multianual del Sector Eléctrico Ecuatoriano*. Quito-Ecuador.
- Aldeán, J. (2014). *Las Fuentes de Energía renovables y su Influencia en el Cambio de Matriz Energética*. Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales , Quito.
- Allen, R., Doherty, T., & Kannberg, L. (1984). *Underground Pumped Hydroelectric Storage*. Washington: Battelle.
- Araneda, R. (2017). *Estudio de evaluación de la peligrosidad por sequías en la cuenca del río paute (ecuador), escenarios presente y futuros*. Universidad de Cantabria, España.
- Arciniega, M., Artieda, A., Andrade, P., & Yáñez, S. (2018). *Centrales Hidroeléctricas del Ecuador*. Universidad Politécnica Salesiana.
- Avilés, E. (2008). La Provincia del Azuay. *Publicación Enciclopedia del Ecuador*, 23-29.
- Blue, S. (n.d.). *Istock*. Retrieved Agosto 2022, 7, from <https://www.istockphoto.com/es/foto/embalse-de-agua-de-la-estaci%C3%B3n-de-eitinal-de-tianhuangping-gm1159140088-316854089>
- Bristol Herald Courier. (2020, Agosto 10). *Herald Courier*. Retrieved from https://heraldcourier.com/gallery/a-tour-of-the-bath-county-pumped-storage-station/collection_4912cbbc-b398-11e7-8cce-9b85a69c6a84.html#anchor_item_1
- Cáceres, L., Mejía, R., & Ontaneda, G. (1998). Evidencias del cambio climático en Ecuador. *Bulletin de l'Institut francais d'etudes andines*, 27(3).

- Cadier, É., Gómez, G., Calvez, R., & Rossel, F. (1997). *Inundaciones y Sequías en el Ecuador*. Quito.
- Calvo, L. (2015, Septiembre 7). Las eólicas como complemento del Sistema Interconectado Nacional. (G. Gubinelli, Interviewer)
- Castro, M. (2011). *Hacia una Matriz Energética Diversificada en Ecuador*. Quito: CEDA.
- CELEC. (2016). *Plan Maestro de Electricidad*. Ecuador.
- CELEC HIDROPAUTE. (2018). *INFORME ANUAL 2017*. Ecuador.
- Celleri, R., Willems, P., Buytaert, W., & Feyen, J. (2007). *Space-time rainfall variability in the Paute basin*. Cuenca: Ecuadorian Andes.
- CENACE. (2020). *Factor de emisión de CO2 del sistema nacional interconectado de Ecuador*. Quito-Ecuador.
- CENACE. (2020). *Informe Anual*. Ecuador.
- Chapallaz, M., Eichenberger, P., & Fischer, G. (1992). *Manual on Pumps used as Turbines* (Vol. 11). Skat.
- COMUNIDAD ANDINA. (2019). *Interconexión Eléctrica*. Retrieved from <https://www.comunidadandina.org/temas/dg2/interconexion-electrica/>
- CONELC. (2008). *Atlas Solar del Ecuador*. Ecuador.
- Corral, C., & Reyes, E. (2020). *Análisis de áreas boscosas en riesgos de erosión debido a niveles de precipitación, incendios o tipo de suelo en la provincia de Azuay*. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil.
- De Noni, G., & Trujillo, G. (1986). Degradación del suelo en el Ecuador. *Revista del Banco Central del Ecuador*, 8(24), 383-394.
- El Mercurio. (2009, Noviembre 7). Sequía obliga a Ecuador a declarar estado de excepción eléctrica. *El Mercurio*, pp. 1-1.
- Électricité de France. (2011, Enero). *Les aménagements emblématiques des Alpes*. Unité de Production Alpes.

- Garzón, E., & Campoverde, M. (2020, Enero 17). Análisis espacial de incendios forestales en la provincia del Azuay. *Polo del Conocimiento*, V(1), 337-361.
- Gobierno Provincial del Azuay. (2015). *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial del Azuay actualizado 2015-2030*.
- Guastay, W., & Llanes, E. (2020). *El Uso de la Energía Hidráulica para la Generación de Energía Eléctrica como Estrategia para el Desarrollo Industrial en el Ecuador*. Instituto Superior Tecnológico Guaranda, Quito.
- Guyer, J. P. (2019). *Una Introducción a Centrales Hidroeléctricas*. El Macero, California, Estados Unidos.
- Hernández, C. (2015). *Energías renovables, tendencias en Ecuador*. Universidad Espíritu Santo, Guayaquil.
- Inga, J. (2015). *Conversión de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas en Sistemas Reversibles Usando Energía Eólica*. Quito.
- Jiménez, R. (2012). *Estudio De Los Factores Técnicos Y Económicos Que Condicionan La Instalación De Centrales Hidroeléctricas De Acumulación Por Bombeo. Evaluación Conceptual De Su Aplicación En CHILE*. Universidad de Chile , Santiago de Chile.
- Lee, N., Grundwald, U., Rosenlieb, E., Mirlitz, H., Aznar, A., Spencer, R., & Cox, S. (2020). Hybrid floating solar photovoltaics-hydropower systems: Benefits and global assessment of technical potential. *ELSEVIER*, 1415-1427.
- Loaiza, Y. (2021, Diciembre 7). La Sequía en Ecuador dejó Pérdidas Millonarias en los Últimos 17 Años. *Infobae*, pp. 1-2.
- López, G. (2022, Enero 31). Almacenamiento Energético por Bombeo: Pasado, Presente y Futuro. Retrieved from Norvento.com.
- Ministerio de Energía y Minas. (2022, Marzo 3). Ecuador asume la coordinación pro-témpore del Sistema de Interconexión Eléctrica Andina.

- Ministerio del Ambiente. (2015). *Preparación del reporte nacional revisado y envío a la convención de las naciones unidas de lucha contra la desertificación*. Subsecretaría de Cambio Climático.
- Ministerio del Ambiente. (2015). *Sinergias entre Degradación de la Tierra y Cambio Climático en los Paisajes Agrarios del Ecuador*. Ecuador.
- Ministerio del Ambiente. (2017). *Deforestación del Ecuador Continental Periodo 2014-2016*. Quito-Ecuador.
- Ministerio del Ambiente y Agua. (2021). *Plan Nacional de Sequía. 2021-2030*. Ecuador.
- Ministerio del turismo. (2021, Noviembre 16). *Ministerio del Turismo*. Retrieved Agosto 5, 2022, from <https://www.turismo.gob.ec/en-loja-la-central-eolica-villonaco-reabre-sus-puertas-al-turismo/>
- Morales, C., & Parada, S. (2005). *Pobreza, desertificación y degradación de los recursos naturales*. Santiago de Chile: Publicación de las Naciones Unidas.
- Morales, P., & Valladarez, A. (2012). *Determinación de las Emisiones de Contaminantes Atmosféricos Producidas por Centrales Térmicas en el Ecuador en el Periodo 2002-2010*. Universidad de Cuenca, Cuenca.
- Navalón, B. (2021). *Nuevas Centrales de Bombeo en España*. Grupo Aragonés.
- NS Energy. (n.d.). *Ns energy*. Retrieved Agosto 4, 2022, from <https://www.nsenerybusiness.com/projects/grand-maison-hydroelectric-power-plant/>
- Núñez Cobo, J., & Verbist, K. (2018). *Atlas de Sequías de América Latina y el Caribe*. UNESCO y CAZALAC.
- Pacheco, H. (2015). *Evaluación de la desertificación en la provincia del Azuay a partir del año 1980*. Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca.
- Peláez, M., & Espinoza, J. (2015). *Energías Renovables en el Ecuador*. Cuenca.
- Pérez, M. (2015). *Calidad de la Energía Eléctrica*. Universidad de Vigo, Vigo-España.

- PETROECUADOR. (2022). *Precios de venta en terminal para las comercializadoras calificadas y autorizadas a nivel nacional*. Quito-Ecuador.
- Popular Science. (1930, Julio). Ten-Mile Storage Battery. *Popular Science*, pp. 60-61.
- Portilla, F., Noguera, M., & Pacheco, N. (2014, Diciembre 16). Diagnóstico multitemporal de las áreas ambientalmente sensibles a la desertificación en la provincia del azuay a partir del año 1982. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*, 20(2), 36-44.
- Power Technology. (2002, Febrero 11). *Power Technology*. Retrieved from <https://www.power-technology.com/projects/tianhuangping/>
- Pozo, A. (2018). *Análisis de la vulnerabilidad al cambio climático de la cuenca del río Paute*. Universidad de Cantabria, Santander.
- Primicias. (2022, Abril 1). *Primicias*. Retrieved Agosto 20, 2022, from <https://www.primicias.ec/noticias/economia/celec-modernizar-hidroelectrica-paute-ecuador/>
- Quinaluisa, C., Peralta, K., Solano, A., Gallo, A., Villalva, Á., & Zambrano, F. (2019). Energía Hídrica en el Ecuador. *Ciencia Digital*, III(2), 219-237.
- Roca, J. (2021). La imparable caída de costes lleva a la fotovoltaica a ser la fuente de energía más barata en varios mercados. *Periódico de la energía*.
- Ruiz, T., & Febles, G. (2004, Junio). La desertificación y la sequía en el mundo. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 8(2).
- Sánchez, M., & Reyes, C. (2015, Diciembre). Ecuador: Revisión a las principales características del recurso forestal y de la deforestación. *Revista Científica y Tecnológica UPSE*, III(1), 41-54.
- Sari, F. (2022). *Análisis del comportamiento de una cuenca hidrográfica tropical utilizando índices hidrológicos. Estudio de caso cuenca del río Paute*. Universidad Católica de Cuenca, Cuenca-Ecuador.

- Sierra, R. (2013). *Patrones y Factores de Deforestación en el Ecuador Continental, 1990-2010*. Quito, Ecuador: Conservación Internacional Ecuador y Forest Trends.
- Solartia. (2022). *Solartia*. Retrieved Agosto 15, 2022, from <https://solartia.com/portfolio-item/loja-energy/>
- Torres, W. (2021, Junio 1). CELEC Tiene un Plan en Casos de Daños Graves en Coca Codo. *Primicias EC*.
- Valarezo, L. (2017). *Caracterización de las sequías meteorológicas en la cuenca del paute mediante la aplicación del índice de precipitación estandarizado en diversas escalas temporales*. Universidad de Cuenca, Cuenca.
- Valderrama, J. (2017). *Los desiertos y la desertificación*. Madrid, España: Los Libros de la Catarata.
- Valiente, Ó. (2001, Marzo 13). Sequía: Definiciones, Tipologías y Métodos de cuantificación. *Investigaciones Geográficas*(26), 59-80.
- Veloz, S., & Vizcaíno, G. (2011). *Análisis del riesgo financiero para el proyecto hidroeléctrico paute-mazar mediante el criterio del pmi a través de simulación montecarlo*. Quito-Ecuador.
- Viedma, R., & Zamora, B. (1997). *Teoría de Máquinas Hidráulicas*. Murcia, España: Universidad de Murcia.
- Wickramarathna, M. (2011, Septiembre). Planning of Pumped Storage Power PLants in Sri Lanka. *SLEMA*, 14(2), 11-20.

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Montiel Vera, Jorge Alejandro**, con **C.C: # 095633637-4** autor del trabajo de titulación: **Centrales hidroeléctricas reversibles en embalses existentes, para optimizar recursos hídricos en las presas de Azuay** previo a la obtención del título de **Ingeniero Civil** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 20 de septiembre de 2022

f. _____

Nombre: **Montiel Vera, Jorge Alejandro**

C.C: 0956336374

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TEMA Y SUBTEMA:	Centrales hidroeléctricas reversibles en embalses existentes, para optimizar recursos hídricos en las presas de Azuay		
AUTOR(ES)	Montiel Vera, Jorge Alejandro		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	Martínez Rehpani, Colón Gilberto		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Ingeniería		
CARRERA:	Ingeniería Civil		
TÍTULO OBTENIDO:	Ingeniero Civil		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	20 de septiembre de 2022	No. DE PÁGINAS:	132
ÁREAS TEMÁTICAS:	Ingeniería civil, Ingeniería Hidráulica, Ingeniería climática.		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	Estiaje, Sequías, Desertificación, Centrales Hidroeléctricas Reversibles, Centrales Termoeléctricas, Transacciones Energéticas.		
RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):	<p>Actualmente, Ecuador enfrenta problemas de sequías estacionales, siendo este uno de los indicadores de procesos de desertificación de algunas zonas del país. Uno de los principales sectores afectados por este fenómeno es el de la generación energética del país. Durante la producción de la temporada seca o de estiaje, la producción energética baja considerablemente debido a la gran importancia de la energía hidráulica para el sector energético del país. El país ha sobrellevado esta problemática mediante el funcionamiento de las centrales termoeléctricas y las compras de energía a países vecinos, de manera que la baja producción de las centrales hidroeléctricas pase desapercibido. Estas soluciones traen consigo consecuencias negativas a nivel ambiental y económico. Por todo lo anterior, en esta investigación se destacan las centrales hidroeléctricas reversibles como sustituto de las centrales termoeléctricas, suponiendo un ahorro en cuanto al gasto que supone las compras energéticas a países vecinos para satisfacer el déficit energético en las temporadas de estiajes, además de la contribución ambiental que supone su uso.</p>		
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SÍ	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593 994399738	E-mail: jorge3008897@live.com	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE):	Nombre: Clara Catalina Glas Cevallos		
	Teléfono: +593 984616792		
	E-mail: clara.glas@cu.ucsg.edu.ec		
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA			
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):			
Nº. DE CLASIFICACIÓN:			
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):			