

Estimación del descenso de volumen del embalse Mazar en Ecuador mediante teledetección

Estimation Of The volume decrease of the Mazar reservoir in Ecuador using remote sensing

Miguel Torres Campozano ¹ & Antonella Bermúdez Zambrano ¹

¹Universidad de Guayaquil, Facultad de Ciencias Naturales, Av. Raúl Gómez Lince s/n y Av. Juan Tanca Marengo, Guayaquil, Ecuador

Recibido 10 febrero 2024, recibido en forma revisada 10 abril 2024, aceptado 10 de mayo 2024, en línea 30 de junio 2024.

Resumen

En este trabajo se estimó el descenso del nivel del principal embalse para generación eléctrica de Ecuador, Mazar, entre los meses de agosto de 2023 a noviembre de 2023 y entre los meses de enero de 2024 y abril de 2024 por medio de imágenes Sentinel-2 y uso del índice de agua de diferencia normalizada (NDWI). Además, se estimó el volumen de agua contenido en el embalse mediante el uso de modelos digitales de elevación del área del embalse y el perímetro del espejo de agua obtenido a partir de la clasificación NDWI. Se encontró que el nivel del embalse descendió 30 m de su cota máxima en noviembre de 2023, y su volumen se redujo al 37,47% de la capacidad total del embalse, mientras que, en abril de 2024, la cota se redujo 42 m, llegando a los 2111,45 m.s.n.m., a tan solo 1 m de la cota mínima de seguridad, mientras que su volumen se redujo al 30.97%.

Palabras clave: GIS, Sentinel 2, NDWI, DEM, ALOSDEM.

Abstract

In this work, the decrease in the level of the main reservoir for electricity generation in Ecuador, Mazar, was estimated between August 2023 to November 2023 and between January 2024 and April 2024 using Sentinel 2 images and the normalized difference water index (NDWI). In addition, the volume of water contained in the reservoir was estimated by using digital elevation models of the reservoir area and the perimeter of the water surface obtained from the NDWI classification. It was found that the level of the reservoir dropped 30 m from its maximum level in November 2023, and its volume was reduced to 37.47% of its total capacity, while, in April 2024, the level was reduced by 42 m, to 2111.45 meters above sea level, just 1 m from the minimum safety level, while its volume was reduced to only 30.97% of the total capacity.

Palabras clave: GIS, Sentinel 2, NDWI, DEM, ALOSDEM.

Introducción

El agua es un recurso vital para la producción de energías renovables y su monitoreo es importante para un adecuado manejo de los recursos hídricos (Karaman and Özelkan, 2022). En Ecuador, más del 90% de la energía eléctrica consumida proviene de plantas hidroeléctricas que aprovechan el gran potencial hídrico originado en cuencas hidrográficas que en última instancia vierten sus aguas en la cuenca del río Amazonas (Zalamea, 2021). El complejo hidroeléctrico más importante del país lo constituye el ahora llamado Complejo Paute Integral, mismo que posee una capacidad instalada de 1757 MWh (sumando las capacidades instaladas de sus tres centrales hidro-

eléctricas) (Zalamea, 2021; CELEC EP, 2024a Durante la segunda mitad de 2023, mientras se esperaba la llegada del Fenómeno del Niño al territorio ecuatoriano, la estación seca, que por lo general no se suele extender de octubre, se extendió durante el mes de noviembre, hasta inicios del mes de diciembre, y no fue hasta fines de ese mes que finalmente comenzaron las lluvias, aumentando el caudal de los ríos que alimentan a los embalses del complejo (CELEC EP, 2024b). Esto trajo como consecuencia un racionamiento eléctrico que afectó social y económicamente al estado ecuatoriano.

Meses más tarde, las lluvias en la cuenca del río Paute disminuyeron y esto condujo a un nuevo período de estiaje, esta vez más crítico. Esto obligó a los fun-

* Correspondencia del autor:

E-mail: miguel.torresc@ug.edu.ec



Esta obra está bajo una licencia de creative commons: atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0. Los autores mantienen los derechos sobre los artículos y por tanto son libres de compartir, copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra.

Tabla 1 Bandas espectrales de Sentinel-2

Banda	Resolución espacial	Longitud de onda	Descripción
B1	60 m	443 nm	Aerosol
B2	10 m	490 nm	Azul
B3	10 m	560 nm	Verde
B4	10 m	665 nm	Rojo
B5	20 m	705 nm	Infrarrojo cercano (VNIR)
B6	20 m	740 nm	Infrarrojo cercano (VNIR)
B7	20 m	783 nm	Infrarrojo cercano (VNIR)
B8	10 m	842 nm	Infrarrojo cercano (VNIR)
B8A	20 m	865 nm	Infrarrojo cercano (VNIR)
B9	60 m	940 nm	Onda corta infrarroja (SWIR)
B10	60 m	1375 nm	Onda corta infrarroja (SWIR)
B11	20 m	1610 nm	Onda corta infrarroja (SWIR)
B12	20 m	2190 nm	Onda corta infrarroja (SWIR)

cionarios del complejo Paute Integral a suspender la generación eléctrica del complejo, siendo que el momento de mayor criticidad el 17 de abril de 2024, cuando la central hidroeléctrica Mazar dejó de funcionar totalmente (CELEC EP, 2024b).

En la actualidad, gracias a satélites de observación terrestre de libre acceso como Landsat-8 o Sentinel-2, es posible llevar a cabo un monitoreo con una resolución temporal y espacial relativamente alta, siendo este tipo de monitoreo una de las alternativas preferidas por varios autores (Avisse et al., 2017; Asbury and Aly, 2019; Karaman and Özelkan, 2022).

Sin embargo, lo más destacado de estas plataformas es su resolución espectral, lo que propicia la generación de cartografía temática, basada en la firma espectral de cada elemento a cartografiar. Entre dichos elementos se encuentra el agua, por lo que datos de plataformas como Landsat-8 o Sentinel-2 constituyen grandes herramientas para el monitoreo de cuerpos de agua, incluyendo embalses como los del Complejo Paute Integral.



Figura 1. Área de estudio del presente trabajo. En azul oscuro se ve el embalse Mazar en la fotografía Sentinel-2 del 19 de agosto de 2023.

Por lo anterior, en este trabajo se pretende aprovechar las posibilidades que ofrece la plataforma Sentinel-2 para el monitoreo de embalses. Varios autores ya han hecho uso de imágenes Sentinel-2 para este tipo de monitoreo (Karaman and Özelkan, 2022), gracias a las 13 bandas espectrales con diferentes resoluciones que ofrece esta plataforma. (Tabla 1).

Para comprobar la eficacia de imágenes Sentinel-2 en el monitoreo de embalses, se escogió el embalse Mazar (Figura 1) por ser el que mayor capacidad de reserva tiene cuando de generación eléctrica se trata. Se buscó entonces, evaluar los cambios ocurridos en el nivel del embalse, así como de volumen (Karaman and Özelkan, 2022), mediante herramientas de Sistemas de Información Geográfica.

Materiales y Método

El desarrollo de este trabajo se dividió en dos partes: la estimación del área del espejo de agua del embalse mediante el uso de imágenes satelitales de Sentinel-2 (Figura 2) y la estimación del volumen de agua contenido en el embalse mediante modelos digitales de elevación. Ambas partes fueron desarrolladas mediante el software ArcGIS Pro 3.3.

Para la estimación del área del espejo de agua del embalse, se utilizaron seis imágenes de Sentinel-2 adquiridas entre agosto de 2023 y abril de 2024. Estas imágenes fueron escogidas por la diferencia de tiempo entre ellas y especialmente por la poca cobertura de nubes en el área de interés. Las seis imágenes fueron descargadas del sitio web Copernicus Browser (ESA, 2024). Estas imágenes fueron descargadas como productos S2-A, lo que implica que ya cuentan con corrección atmosférica, radiométrica y topográfica, importante para una adecuada clasificación temática.

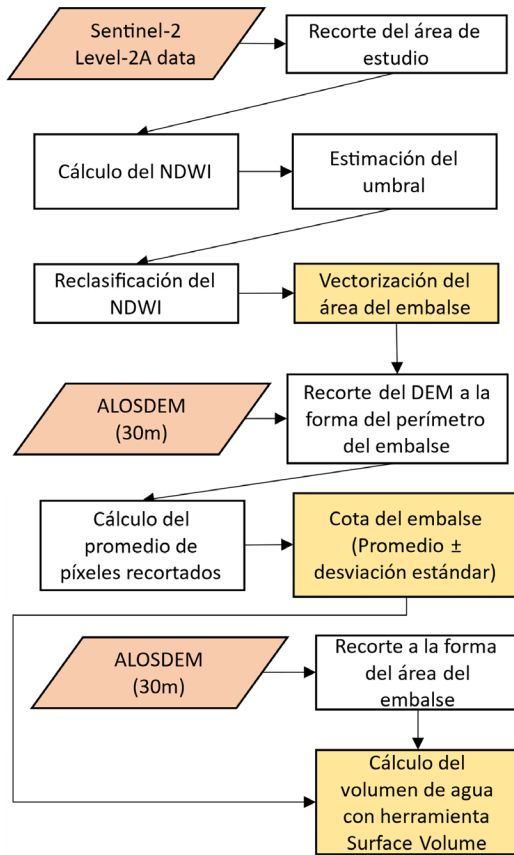


Figura 2. Flujo de trabajo para la estimación del área del embalse.

Para delimitar el área del embalse Mazar, se utilizó el Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI por sus siglas en inglés) (McFeeters, 1996). Este índice se basa en el uso de las bandas espectrales del verde (GREEN) y el infrarrojo cercano (NIR), que para Sentinel-2 corresponden a la banda 3 y a la banda 8 respectivamente (Ver Ecuación 1).

$$\text{Ecuación 1 } NDWI = \frac{\text{banda3} - \text{banda8}}{\text{banda3} + \text{banda8}}$$

De este modo, mediante la aplicación del NDWI, se consigue un ráster donde los valores más altos están asociados a la presencia de cuerpos de agua en superficie, incluyendo el espejo de agua del embalse (Karaman and Özelkan, 2022). Tras esto, es necesario establecer un umbral para clasificar cada imagen en dos coberturas: agua y lo que no es agua. Los píxeles que corresponden a agua suelen ser valores positivos, mientras que los píxeles con valores negativos suelen corresponder a otras coberturas, por lo que el umbral se podría establecer en 0. Tras establecer el umbral se hizo una reclasificación de ambas imágenes, asig-

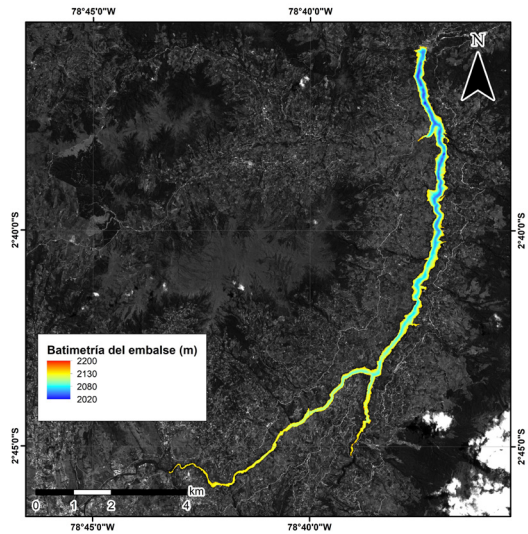


Figura 3. Batimetría del embalse Mazar según DEM extraído de ALOSDEM

nando el valor de 1 a los píxeles que corresponden a agua y *NoData* para los píxeles restantes. A continuación, se procedió a vectorizar las áreas clasificadas como agua.

Ocasionalmente la cobertura de nubes puede arrojar valores positivos que pueden confundirse con agua. Para corregir esto, se le hizo una edición manual a la capa de polígonos, dejando únicamente el polígono correspondiente al embalse (Figura 2). Finalmente se calculó el área del espejo de agua a partir de las capas vectoriales generadas.

Para la estimación del volumen de agua contenida al momento que fueron tomadas las imágenes, se aprovechó el modelo digital de elevaciones (DEM por sus siglas en inglés) de ALOSDEM de resolución 30 m (Tadono et al., 2014). Este modelo está basado en imágenes RADAR adquiridas entre los años 2006 y 2011 (Tadono et al., 2014). Concretamente, las estereoes imágenes RADAR usadas para construir el DEM del área de estudio fueron tomadas antes de que terminara la construcción del embalse, por lo que este DEM sirve como modelo batimétrico del fondo del embalse, suponiendo que no ha habido cambios significativos por la sedimentación (Figura 3).

Para la estimación de la cota del espejo de agua del embalse, se calculó el promedio de los píxeles del DEM que se interceptaron con el perímetro del embalse (Figura 2). Esto debido a que, aunque idealmente todos los píxeles del perímetro deberían corresponder a la misma cota, tanto el modelo digital de elevaciones, como la delimitación del embalse por NDWI tienen un margen de error, debido principalmente a la resolución espacial (10 m para las imágenes Sentinel-2 y 30 m para las ALOS DEM), y a que ALOSDEM tiene una precisión vertical de ± 5 m (Tadono et al., 2014).

Resultados y DISCUSIÓN

Para las fechas escogidas, el embalse Mazar alcanzó una cota máxima de 2148.02 m (Tabla 2), cercana a la cota máxima de diseño de 2153 m (CELEC EP, 2024b). Para el 17 de noviembre de 2023 la cota descendió a los 2123,23 m.s.n.m., bajando aún más en los siguientes días de noviembre cuando la crisis se agudizó. Sin embargo, fue para el 15 de abril de 2024 cuando el embalse descendió a su nivel más bajo, llegando a los 2111.49 m.s.n.m. (Figura 4 y Figura 5), uno de los niveles más bajos desde que el embalse entrara en funcionamiento en el 2010 (CELEC EP, 2024b). Como se describe en la Tabla 2, el error absoluto fue relativamente bajo, no siendo mayor a 4 m al compararse los resultados obtenidos en este estudio, con los valores medidos por CELEC. Además, se notó que este error absoluto fue ligeramente mayor cuando el nivel del embalse era igualmente mayor. Por otro lado, la desviación estándar en la estimación del nivel del embalse para cada fecha fue ligeramente mayor cuanto menor era el nivel del embalse. Esto podría estar relacionado con la sedimentación, puesto que se notó una importante discrepancia entre el espejo de agua esperado según el DEM de ALOSDEM y el espejo de agua observado debido a las zonas del fondo del embalse que se han rellenado con sedimentos y que han quedado expuestas de manera histórica en durante las crisis de noviembre de 2023 y de abril de 2024. Particularmente esto quedó más patente en la imagen del 15 de abril de 2024. Otra posible causa de error podría estar relacionada con inconsistencias geométricas por el DEM utilizado al para ortorectificar la imagen, por lo que sería necesario utilizar imágenes en crudo de Sentinel 2 para poder llevar a cabo una ortorectificación con un DEM que se ajuste mejor a topografía actual de la zona de estudio. Aun así, tomando en cuenta lo anterior, es probable que la mayor fuente de error en la estimación se deba a los cambios que ha sufrido la batimetría del embalse por la sedimentación. Por otra parte, merece destacarse el error relativamente bajo, considerando la resolución de las imágenes Sentinel 2 y del DEM de ALOSDEM, siendo que este último tiene un error medio más

alto (Tadono et al., 2014) que el error absoluto más alto obtenido en la estimación de este estudio.

Adicionalmente, como se aprecia en la Figura 4, la precisión en el dibujo del límite del embalse dependerá de la pendiente de su batimetría, por lo que cuando esta sea mayor, dada la resolución espacial de las imágenes Sentinel 2, las líneas del límite del embalse para diferentes niveles tenderán a estar más juntas y entrar en el margen de error debido a la escala de Sentinel 2. Esta pendiente variable en el embalse puede apreciarse mejor en la Figura 5, donde el flanco noroeste tiene mayor pendiente que el flanco este. Por consiguiente, el error podría disminuirse si se discrimina las zonas con pendientes fuertes, eliminándolas del perímetro para la estimación del nivel del embalse.

A partir del DEM, se estimó que el volumen de agua en el embalse al 19 de agosto de 2023 fue de 330,97 hm³, aproximadamente un 84% del volumen total del embalse según Zalamea (2021), mientras que para el 1 de noviembre el volumen estimado fue de 2123,23 hm³, un 37,47% de la capacidad del embalse. Por otro lado, cuando las lluvias en el mes de diciembre finalmente permitieron que el embalse se recuperara, este alcanzó un volumen 279.59 hm³ para el mes de enero de 2024. Aunque este volumen era mucho más saludable para el Complejo Paute Integral, se encontraba lejos de los niveles del mes de agosto, sugiriendo que las lluvias no permitieron una recuperación total de los caudales del embalse. Este hecho pudo acrecentar la crisis que devino después cuando el volumen del embalse se redujo a 211.32 hm³ el 21 de marzo de 2024 y finalmente los 122.03 hm³ el 15 de abril de 2024, probablemente el volumen más bajo que ha almacenado el embalse Mazar desde su entrada en funcionamiento (alrededor del 30,97% de su capacidad total).

Tabla 2 Comparativa de la cota calculada a partir de imágenes Sentinel-2 versus la cota medida por CELEC (2024). También se denota el volumen del embalse para la cota calculada.

Fecha	Cota calculada (m.s.n.m)	Cota CELEC (m.s.n.m)	Error (m)	Volumen calculado (hm ³)
15/4/2024	2111.49	2109.52	1.97	122.03
5/4/2024	2116.12	2116.49	-0.37	142.45
21/3/2024	2129.23	2127.83	1.4	211.32
26/1/2024	2141.32	2143.5	-2.18	279.59
17/11/2023	2123.23	2122.39	0.84	174.59
19/8/2023	2148.02	2151.96	-3.94	330.97

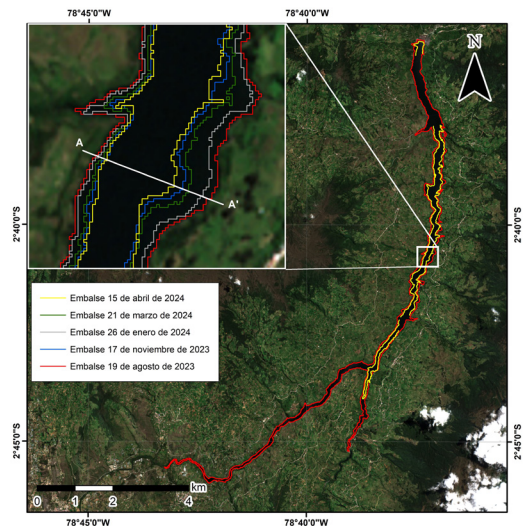


Figura 4 Comparativa del área del embalse entre agosto de 2023 y abril de 2024. Las zonas donde se interrumpe para el 15 de abril de 2024 se deben a la cobertura parcial de nubes.

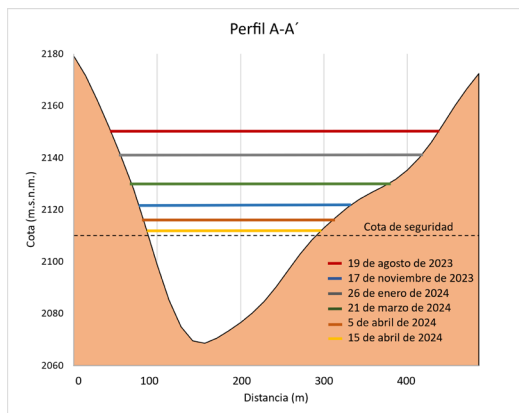


Figura 5 Perfil A-A' del embalse donde se denota el descenso del nivel de este.

A todo esto, hay que acotar que este volumen puede estar sobredimensionado, puesto que no se considera la reducción de la capacidad total del embalse debido a la sedimentación. La cota mínima de seguridad del embalse Mazar, según recoge Zalamea (2021) es de 2110 m.s.n.m., lo que denota la criticidad del nivel del embalse durante los meses de noviembre 2023 y abril de 2024, conduciendo a racionamientos de electricidad en todo el país. Si bien es cierto que es el embalse Amaluza el que alimenta a la central hidroeléctrica Paute, que es la que mayor capacidad instalada tiene, Mazar es el que indirectamente proporciona la mayor cantidad de recurso hídrico para la generación eléctrica (Zalamea, 2021).

La amplia cobertura de nubes sobre el embalse en las fotografías Sentinel-2 en varias de las fechas intermedias impide aplicar esta metodología, para reconstruir la tasa de descenso del nivel del embalse a corto plazo. Sin embargo, el bajo error absoluto obtenido, no mayor a 4 m, sugiere que este análisis combinado entre modelos digitales de elevaciones e imágenes satelitales multiespectrales de resolución media permite monitorear el nivel de embalses artificiales, especialmente si se cuenta con topografía previa al mismo (Karaman and Özelkan, 2022), tal como se evidencia en el presente trabajo. La principal limitante para su aplicación es la cobertura de nubes, que, en regiones tropicales, próximas a la cuenca amazónica, es bastante frecuente y extendida. Una variante podría conllevar el uso de imágenes RADAR como las del satélite Sentinel-1, aunque con una resolución (12 m) y precisión efectiva en la clasificación notablemente más bajas.

Conclusión

El embalse Mazar experimentó un estiaje que llevó a su espejo de agua de la cota 2148,02 m.s.n.m. el 19 de agosto de 2023, a inicios de la estación seca, a los 2122,39 m.s.n.m. el 17 de noviembre de 2023, semanas antes de las primeras lluvias de la siguiente estación lluviosa. De este modo, el embalse quedó a

tan solo 12 m.s.n.m. de su cota de seguridad, habiendo experimentado un descenso de 26 m. El volumen de agua represada se redujo hasta un 37,47% de su capacidad total, motivo por el que en Ecuador se tuvo que recurrir a racionamientos de electricidad, para sostener las reservas del embalse.

Un segundo estiaje condujo a una disminución hasta los 2111,49 m.s.n.m. el 15 de abril de 2024, dejándolo a tan solo 1 m.s.n.m. de la cota de seguridad y reduciendo su volumen hasta un 30,97%, dejando a la central Mazar inoperativa al 17 de abril de 2024, cuando según registros de CELEC, el embalse alcanzó su mínimo histórico de 2106 m.s.n.m. La metodología presentada en este trabajo ha demostrado ser efectiva para la estimación del área del espejo de agua de embalses como Mazar, lo cual se evidencia en el bajo error absoluto de la cota del perímetro del embalse (no mayor a 4 m), en la cual no solo consta el error en la clasificación de la imagen, sino también el error absoluto del DEM (± 5 m) y los efectos de la sedimentación. Las estimaciones de volumen son coherentes con los valores totales y mínimos del embalse, sin embargo, es probable que este volumen esté sobredimensionado, pues no se considera la sedimentación en el embalse que debe haber reducido la capacidad total del mismo con el paso de los años.

Referencias

- Asbury, Z., and Aly, M.H., 2019, A geospatial study of the drought impact on surface water reservoirs: study cases from Texas, USA: *GIScience and Remote Sensing*, doi:10.1080/15481603.2019.1582154.
- Avisse, N., Tilmant, A., François Müller, M., and Zhang, H., 2017, Monitoring small reservoirs' storage with satellite remote sensing in inaccessible areas: *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 21, p. 6445-6459, doi:10.5194/hess-21-6445-2017.
- CELEC EP, 2024a, Central Hidroeléctrica Paute Mazar: <https://www.celec.gob.ec/celecurs/informacion-tecnica/central-hidroelectrica-paute-mazar/>.
- CELEC EP, 2024b, Producción Eléctrica CELEC: Gráficas de Producción, <https://generacioncsr.celec.gob.ec/graficasproduccion/> (accessed May 2024).
- ESA, 2024, Copernicus Sentinel 2 Data:, browser.dataspace.copernicus.eu (accessed May 2024).
- Karaman, M., and Özelkan, E., 2022, Comparative assessment of remote sensing-based water dynamic in a dam lake using a combination of Sentinel-2 data and digital elevation model: *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 194, doi:10.1007/s10661-021-09703-w.
- McFeeters, S.K., 1996, The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features: *International Journal of Remote Sensing*, v. 17, p. 1425-1432, doi:10.1080/01431169608948714.
- Tadono, T., Ishida, H., Oda, F., Naito, S., Minakawa, K., and Iwamoto, H., 2014, Precise Global DEM Generation by ALOS PRISM: *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v. II-4, p. 71-76, doi:10.5194/isprsannals-ii-4-71-2014.
- Zalamea, J., 2021, Medium-Term Hydrothermal Dispatch applied to Paute Integral Hydroelectric Complex Despacho Hidrotérmico de Mediano Plazo aplicado al Complejo Hidroeléctrico Paute Integral: , p. 95-105.