

Adjustment value of water leakage index in infrastructure

Juan Carlos García-Espinosa & Holger Benavides-Muñoz

Universidad Técnica Particular de Loja - UTPL, Loja-Ecuador; jcgarciae@hotmail.com, hmbenavides@utpl.edu.ec

Received: August 24th, de 2017. Received in revised form: September 12th, 2018. Accepted: December 10th, 2018

Abstract

At present it is estimated that 85% of the population has access to an adequate service of drinking water; but about 40% is not registered or billed, for leakage or clandestine outlets, which is a problem in the management and distribution of water for human consumption. A way to determine the efficiency of the system based on the values of the leakage flows, having as main indicator the infrastructure leakage index (ILI), which allows to measure the effectiveness of maintenance activities of red. In developed countries this index is considered, with an average pressure value during the 24 hours of the day; but the reality of the developing countries is another, so in this paper the two alternatives for the correction of the ILI are presented, based on statistical data on the unaccounted-for water of an Ecuadorian population

Keywords: ILI; distribution of drinking water; unregistered water.

Valor de ajuste del índice de fugas de agua en infraestructuras

Resumen

En la actualidad se estima que un 85% de la población tiene acceso a un servicio adecuado de agua potable; sin embargo, cerca de un 40% no es registrada o facturada, debido a pérdidas, fugas o tomas clandestinas, lo que constituye un problema en la gestión y distribución de agua para consumo humano. Una manera de determinar la eficiencia del sistema es basándose en los valores de los caudales de fuga, teniendo como principal indicador el índice de fuga estructural (IFE), que permite medir la efectividad de actividades de mantenimiento de la red. En países desarrollados este índice es considerado, con un valor de presión promedio durante las 24 horas del día; pero la realidad de países en vías de desarrollo es otra, por lo que en este trabajo se presentan dos alternativas para la corrección del IFE, basándose en datos estadísticos del agua no contabilizada de una población ecuatoriana.

Palabras clave: índice de fuga estructural (IFE); distribución de agua potable; agua no registrada.

1. Introducción

Como es conocido, el agua es un elemento natural, esencial para la vida y su buena calidad es decisiva para el bienestar humano, los procesos ambientales equilibrados, así como el sustento económico y el desarrollo de la humanidad. No es un recurso natural ordinario, es también un recurso socioeconómico, político y estratégico. Por ende es de interés mundial y prioritario en todo ámbito. La gestión social llegó a este acuerdo en el año 1992, donde se llevó a cabo la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Ambiente y el Desarrollo. Los acuerdos en la Cumbre de las Américas y los principios de Dublín, tienden a hacer un uso sustentable de este recurso [1].

Sandoval-Moreno y Gunther (2013), indican que investigaciones sobre la gestión del agua en el mundo

demuestran que no existe un único modelo en la administración y organización del recurso, sino que es diversa, al igual que el tipo de actores locales que la utilizan [2].

Según Fernández (2005) el acceso al agua potable está ligado directamente a la salud humana y a su desarrollo; en la década de los 90's el porcentaje de personas con acceso a agua tratada se elevó del 79% al 82%, pero existen más de mil millones de personas en el mundo que carecen de acceso a un suministro fijo de agua para consumo [3]. Para Latinoamérica el 80% de la población accede a un suministro de agua adecuado [4]. Cada Estado es responsable de elaborar políticas y crear un marco normativo adecuado para cubrir este déficit creando las empresas y/o gobiernos locales, que son los encargados de ofrecer servicios de agua potable

y de explotar los recursos en términos sustentables y sostenibles [2].

El agua potable es un derecho humano que ya ha sido reconocido internacionalmente [5]. Sin embargo, solamente cerca del 85% de la población de América Latina cuenta con este servicio mediante conexión o con acceso en una fuente pública, persistiendo una desigualdad entre zonas urbanas y rurales [3,5].

A nivel global, se estima que el volumen de agua no contabilizada cada día alcanza los 45 millones de metros cúbicos, debido a fugas o a fraudes y mediciones imprecisas [6]. Un uso eficiente del agua implica modificar prácticas de algunos usuarios del agua y poder aprovechar la infraestructura existente [7]. Un estudio de la Agencia de Regulación del Agua en el Ecuador ARCA, reveló que el 46% del agua potable en el Ecuador no es facturada [8]. En ciudades de Colombia con 100.000 habitantes ó 20.000 usuarios, catalogadas como ciudades intermedias el índice de agua no contabilizada llega a un 41% [9]. En el Ecuador según el Código Orgánico de Organización Territorial, COOTAD [10] estos servicios, son competencia exclusiva de los gobiernos autónomos descentralizados municipales, existiendo en muchos sistemas de agua potable grandes diferencias entre el volumen de agua tratada con el volumen comercializado. Es por esto que la gestión del agua urbana ha desarrollado en los últimos años grandes esfuerzos, que logran determinar la localización tipo y cantidad de agua fugada, o con tecnologías aplicadas como la sectorización hidráulica, reducción y control de presiones, como en el caso de la Empresa Pública Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Ibarra que estima reducir el índice de agua no contabilizada del 40% al 30% en el año 2021 [11-13].

Abarca y Benavides (2012) tratan el tema de fugas, como uno de los factores del agua no contabilizada, indicando que las mismas en redes de distribución son eventos continuos, constituyéndose un problema en la distribución de agua potable, pero a través de ellas se puede convenir si el sistema es excelente o deficiente, basándose principalmente en los volúmenes de agua que fugan y en el valor de algunos indicadores que se utilizan en la gestión activa de fugas, como es el índice de fuga estructural (IFE) [14].

Al IFE se lo puede definir como el volumen anual de pérdidas reales de una red (CARL) dividido por las pérdidas inevitables reales anuales (UARL). Donde el UARL representa el caudal más bajo para un sistema bien administrado [15, 16]. El concepto del IFE se inicia en el año 2000 teniendo acogida alrededor del mundo, y aprobado por la International Water Association (IWA) y la American Water Works Association (AWWA, 2006) [14].

La ecuación básica citada por varios autores para calcular el IFE es [15,16]:

$$IFE = \frac{CARL}{UARL} \quad (1)$$

Para determinar el CARL, se considera el caudal fugado y el número de acometidas existentes en el sector, además el número de días en los cuales se está realizando el análisis es [14]:

$$CARL = \frac{Volumen\ inyectado - Volumen\ facturado}{Na \times d} \quad (2)$$

La ecuación desarrollada para determinar las pérdidas inevitables reales anuales UARL expresada en l/día es [15]:

$$UARL = (18 \times Lm + 0.80 \times Na + 25 \times Lp) \times P \quad (3)$$

Donde; d, es el número de días en el que se realiza el análisis; Lm, la longitud de la red de distribución en kilómetros (Km); Na. El número de acometidas existentes; Lp, la longitud promedio de tubería de la red principal hasta la acometida en kilómetros (Km) y P, la presión promedio del sistema en metros de columna de agua (m.c.a.)

Si se quisiera expresar en unidades de l/acometida/día, a la ecuación se la divide para el número de acometidas existentes (Na) [14].

El IFE permite medir la efectividad de las actividades de reparación y rehabilitación de la red como resultado de la gestión de fugas en relación a la presión de servicio del sistema, influyendo directamente en el estado de la infraestructura del mismo. Por lo que para su cálculo se involucra factores como: la longitud de la red, número de acometidas, longitud de acometida, y la presión promedio de la red durante las 24 horas de servicio.

Al ser el IFE un índice que se basa en la presión promedio durante las 24 horas del día, y dada la realidad de muchos de los sistemas de agua, donde los cortes o racionamientos se dan con mucha frecuencia; además de que las redes de distribución trabajan sobre su vida útil establecida, es necesario adaptar y ajustar este índice tomando en cuenta estas variables. En el presente trabajo se formula un ajuste del índice estructural de fugas, considerando el transcurso de los años.

2. Metodología

2.1. Recopilación de la información

Se logró obtener los datos del comportamiento estadístico de consumo de agua potable en una ciudad de la sierra ecuatoriana, desde el año 2008 hasta el año 2016. En donde se indica la cantidad de agua producida y distribuida para los usuarios de la ciudad y la cantidad de agua que es facturada oficialmente, incluye datos de consumos en parques, mercados y otros lugares públicos. Además, se consideró el número de abonados que están en uso. La información proporcionada está organizada de forma mensual.

2.1 Análisis de datos obtenidos

Se realiza el cálculo del IFE para cada uno de los 60 meses en los que se disponen datos, se elabora un diagrama de dispersión del valor calculado del Índice de fugas estructural en base al tiempo. Analizándolos de dos maneras:

Para el primer caso se toma la muestra en conjunto, considerándolos como aleatorios de diferentes tamaños.

En el segundo caso se escogen los datos, desechando algunos valores que debido a la dinámica de crecimiento que existe dentro de la distribución de agua potable y a la reparación de fugas detectadas; quedando un periodo de tiempo en el cual se observa un crecimiento paulatino del IFE.

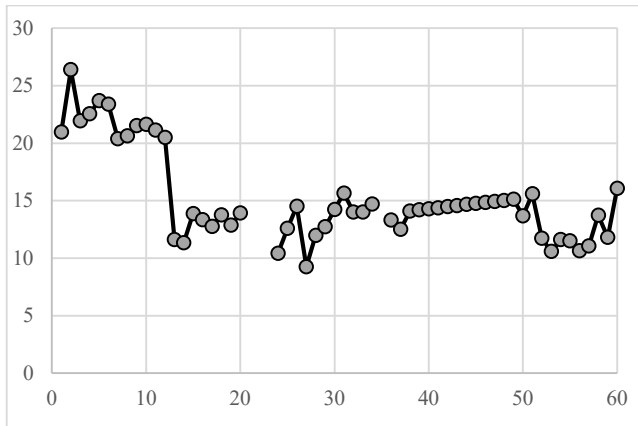


Figura 1. Variación del IFE en el tiempo (meses).
Fuente: [18] Tabulación autores.

Tabla 1. Parámetros Gumbel Máxima Entropía

T (meses)	1/Tr	P(1-1/Tr)	IFE	Años
12	0.083	0.917	20.63	1
24	0.042	0.958	22.71	2
60	0.017	0.983	25.42	5
120	0.008	0.992	27.45	10
180	0.006	0.994	28.63	15
240	0.004	0.996	29.47	20
300	0.003	0.997	30.12	25
360	0.003	0.997	30.65	30

Fuente: Autores

Con base en el análisis de los datos seleccionados del IFE se presenta dos alternativas de corrección del IFE, para posteriormente compararlas entre sí.

3. Resultados y discusión

La evolución de los valores mensuales del IFE, son bastante fluctuantes, entre valores máximos de 26.38, a valores de 9.26. Esto se debe a que la dinámica, tanto en el crecimiento del sistema, como en su mantenimiento hace que el patrón sea cambiante. (Ver Fig. 1). Sin embargo se observa que entre los meses 38 al 49, la evolución del IFE es constante, siendo estos meses los del año 2014, que es cuando se produjo una transición dentro de la autoridad principal del Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal, debido a un proceso electoral, en la cual no existieron ampliaciones considerables en el sistema de distribución [17].

3.1. Análisis de distribución

Considerando que los valores del IFE de la Unidad Municipal operadora del servicio de abastecimiento de agua, son muestras de diferentes tamaños de distribución, y que provienen de un proceso aleatorio, se los correlaciona con una distribución de Gumbel, teniendo una media de 15.20, una desviación estándar de 3.96 y un coeficiente de asimetría de 1.09 [19].

Ocupando el principio de máxima entropía, conocido como POME, que viene siendo utilizado para derivar procedimientos

Tabla 2. Parámetros Gumbel Máxima Momentos

T (meses)	1/Tr	P(1-1/Tr)	IFE	Años
12	0.083	0.917	20.97	1
24	0.042	0.958	23.18	2
60	0.017	0.983	26.05	5
120	0.008	0.992	28.20	10
180	0.006	0.994	29.46	15
240	0.004	0.996	30.35	20
300	0.003	0.997	31.04	25
360	0.003	0.997	31.61	30

Fuente: Autores

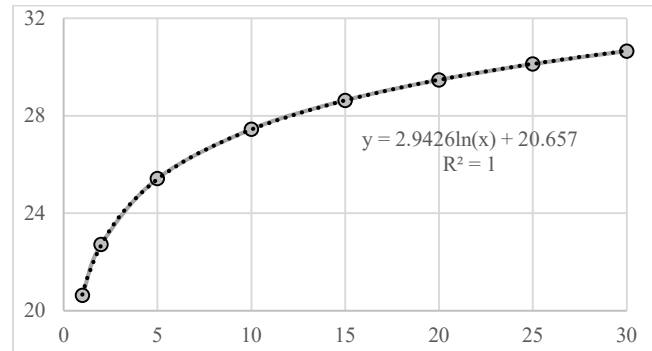


Figura 2. Variación del IFE propuesto por años de servicio
Fuente: Tabulación autores.

alternativos de estimación de parámetros de la distribución bivariado de valores extremos con marginales Gumbel [20], los resultados se presentan en la Tabla 1. El modelo es comparado con los proporcionados por la técnica de momentos [21], que son presentados en la Tabla 2.

En ambos casos se observan resultados parecidos, con una buena aproximación para el valor del IFE en relación a los años de servicio del sistema de distribución.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se observa que la técnica propuesta representa una buena opción. Según se muestra en la Fig. 2.

Utilizando un modelo por las funciones intrínsecamente lineales en este caso la función potencial del tipo [22]:

$$y = b \times X^{b_0} \quad 0 < b_0 < 1 \quad (4)$$

Donde b es el valor actual del IFE, y X el tiempo de servicio del sistema. Aplicando una regresión potencial con el método de mínimos cuadrados se obtiene

$$b_0 = 0.1365 \quad (5)$$

De las Ecuaciones 1, 4 y 5 se deduce:

$$IFE = \left(\frac{CARL}{UARL} \right) \times T^{0.1365} \quad (6)$$

Donde T, es el tiempo en años.

Por lo que el IFE, modificado obtendría los valores referenciales, indicados en la Tabla 3.

Tabla 3.
Valor IFE modificado

Años	IFE				
	2	4	6	8	18.9
1	2.000	4.000	6.000	8.000	18.900
2	2.198	4.397	6.595	8.794	20.775
5	2.491	4.983	7.474	9.965	23.542
10	2.738	5.477	8.215	10.954	25.878
15	2.894	5.788	8.683	11.577	27.350
20	3.010	6.020	9.030	12.040	28.445
25	3.103	6.206	9.310	12.413	29.325
30	3.181	6.363	9.544	12.725	30.064

Fuente: Autores

Tabla 4.
Valor IFE, con un crecimiento de pérdidas anuales

IFE actual	Años	Factor	IFE propuesto
18.9	1	1.012	19.125
18.9	2	1.024	19.352
18.9	3	1.036	19.583
18.9	4	1.048	19.816
18.9	5	1.061	20.052
18.9	10	1.126	21.273
18.9	15	1.194	22.570
18.9	20	1.267	23.945
18.9	25	1.344	25.404
18.9	30	1.426	26.952

Fuente: Autores

El análisis de distribución ha sido por años utilizado en diversas ramas como la ingeniería estructural, hidrología, ciencias geológicas, riesgo financiero. Por lo que es una técnica que ha sido comprobada en algunos campos, dando buenos resultados.

3.2. Crecimiento de pérdidas

Si se considera un porcentaje de crecimiento de pérdidas reales anuales, debido al tiempo de uso de la tubería, se la podría relacionar con los años de servicio del sistema, quedando de la siguiente forma:

$$IFE = \frac{CARL}{UARL} (1 + r)^n \quad (7)$$

Donde r es el porcentaje de crecimiento de pérdidas reales anuales y n el número de años.

Entre los meses 38 al 49, de los datos brindados por la Unidad Municipal, se obtiene un crecimiento anual en pérdidas de 1.19%. Por lo que la evolución del IFE en 30 años de servicio se ve en la Tabla 4.

Sin embargo, para la utilización de este método, se requiere de datos previos para determinar el crecimiento de las pérdidas, y al estar los sistemas de distribución de ciudades en continuo cambio, es difícil lograr tener un dato exacto para este parámetro.

Un valor de IFE, adaptado a la edad de la tubería es necesario, por la realidad que algunas ciudades de países en vías de desarrollo, cuentan con sistemas de distribución de agua, con más de 30 años de servicio, influenciando directamente a los valores de este índice.

Las ecuaciones propuestas se deberían comprobar con datos de distintos sistemas de abastecimiento para lograr un mayor acercamiento del valor de ajuste.

4. Conclusiones

Los datos que permitieron el presente trabajo, son los suscitados en una ciudad de la sierra ecuatoriana, desde el año 2008 hasta el año 2016; lo que nos da la evidencia de manejar datos reales; sin embargo, por motivos de política interna del Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal no es posible hacer pública su localización.

De los dos mecanismos propuestos, el primero basado en un análisis de distribución es el que se ajusta más a la realidad y a la evolución del IFE en el transcurso de los años, sin tener el sistema de distribución de agua un mantenimiento adecuado.

Los métodos propuestos ya han sido utilizados en otros campos del accionar científico, teniendo buenos resultados; pero no se han ocupado en el área de auditorías de gestión de sistemas de agua.

Las variaciones encontradas del IFE en el transcurso del tiempo, demuestran que este índice depende también del periodo de servicio del sistema de distribución de agua.

Referencias

- [1] Peña, A., Una perspectiva social de la problemática del agua. Investigaciones geográficas, boletín del Instituto de Geografía, UNAM, Num. [en línea]. 62, pp. 125-137, 2007. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n62/n62a8.pdf>
- [2] Sandoval-Moreno, A. y Gunther, M., La gestión comunitaria del agua en México y Ecuador: otros acercamientos a la sustentabilidad, Ra Ximhai, Universidad Autónoma Indígena de México, [en línea]. 9(2), pp. 165-179, 2013. Disponible en: <http://revistas.unam.mx/index.php/rxm/article/view/53968>
- [3] Fernández, A. y Mortier, C., Evaluación de la condición del agua para consumo humano en Latinoamérica, Curso Posibilidades para la provisión de agua segura usando nuevas tecnologías, [en línea]. 2005. pp. 17-32. Disponible en: <https://www.psa.es/es/projects/solarsafewater/curso.php>
- [4] Rodríguez-Miranda, J., Garia-Ubaque, C. and Penagos-Londoño, J., Analysis of the investment costs in municipal wastewater treatment plants in Cundinamarca aguas residuales municipales en Cundinamarca, DYNA, 82(192), pp. 230-238, 2015.
- [5] Paquin, M., El derecho humano al agua potable y al saneamiento, Curso, en WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas). 2016. Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo 2016: Agua y Empleo, París, UNESCO. [en línea]. 2016. pp. 55-56. Disponible en: <http://unesdoc.unesco.org/images/0024/002441/244103s.pdf>
- [6] Alvarez, M., Castellvi, E., Monzo, M. y Verdú, C., La eficiencia en los sistemas de distribución: revisión sobre la gestión del agua no registrada, Aquepapers, [en línea]. 4., pp. 6-24, 2014. Disponible en: <http://www.fundacionaqua.org/actualidad/aquaepapers-4-eficiencia-en-la-gestion-de-recursos-hidricos/>
- [7] Perpiñan, A., Metodología para la evaluación y selección de alternativas de aprovechamiento, ahorro y uso eficiente del agua en el sector institucional, M.Sc. Tesis, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 2013.
- [8] El Telegrafo, El desperdicio de agua potable le cuesta al país. [en línea]. 2016. Disponible en: <http://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/quito/11/el-desperdicio-de-agua-potable-le-cuesta-al-pais-usd-100-millones-al-ano>

- [9] Gómez, P., Implicaciones financieras de los programas de reducción del índice de agua no contabilizada, Tesis, Facultad de administración, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 2003.
- [10] Presidencia de la Republica de Ecuador, Código Orgánico De Organización Territorial, COOTAD, Registro Oficial., 2015, 55 P.
- [11] Atef, A., Zayed, T., Hawari, A., Khader, M. and Moselhi, O., Multi-tier method using infrared photography and GPR to detect and locate water leaks, Science Direct, 2015. DOI: /10.1016/j.autcon.2015.10.006
- [12] Arturo, L., Resumen de los avances tecnologicos en el campo de la ingeniería sanitaria, Ingeniería e Investigación [en línea]. 3, 1982. pp. 46-53 Disponible en: <http://revistas.unal.edu.co/index.php/ingeniv/article/view/28727>
- [13] EMAPA-I, Moderna tecnología para control y reducción de pérdidas de agua potable. [en línea]. 2017. Disponible en: <http://www.emapaibarra.gob.ec/index.php/noticias-blog/632-moderna-tecnologia-para-control-y-reduccion-de-perdidas-de-agua-potable.html>
- [14] Abarca, D. and Benavides, H., Técnicas de detección y localización de fugas de agua en redes de distribución, Tesis, Departamento de Geología, Minas e Ingeniería Civil, Universidad Técnica Particular de Loja, Loja, Ecuador, 2012.
- [15] Delgado, D., Infrastructure Leakage Index (ILI) as a regulatory and provider tool, Thesis, Department of Civil Engineering and Engineering Mechanics, University of Arizona, Arizona, EEUU, 2008.
- [16] Winarni, W., Infrastructure Leakage Index (ILI) as water losses indicator, Civil Engineering Dimension., [online]. 11(2), pp 126-134, 2009. Available at: https://www.researchgate.net/publication/26872179_Infrastructure_Leakage_Index_ILI_as_Water_Losses_Indicator
- [17] Consejo Nacional Electoral. Todo listo para el proceso electoral 2014, [en línea]. 2014. Disponible en: <http://cne.gob.ec/es/institucion/sala-de-prensa/noticias/2229-todo-listo-para-el-proceso-electoral-2014>
- [18] Gobierno Autonomo Decentralizado, Datos de consumo de agua potable en una ciudad de la sierra ecuatoriana, 2016.
- [19] Pacheco, P. and Cogua, R., Comparacion por simulacion de tres metodos de estimacion de parametros para la distribucion de Gumbell con muestras aleatorias y autocorrelacionadas, Revista Colombiana de Estadística, Nro. s, pp. 23-24, 1991.
- [20] Escalante-Sandoval, C., Análisis de eficiencia de la distribución Bi-Gumbel, Ingeniería Investigación y Tecnología, UNAM, [en línea]. 6(001), pp. 13-17, 2005. Disponible en: <http://www.revistas.unam.mx/index.php/ingenieria/article/view/13528>
- [21] Torres, J., Ordoñez, J. and Duque, R., Comparación de los métodos de máxima verosimilitud y l-momentos en el análisis de frecuencias en la cuenca alta del río Magdalena, en: XX Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología, Barranquilla, Colombia, 8 al 10 de agosto de 2012, [en línea]. 2012. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/230853448_Comparacion_de_los_Metodos_de_Maxima_Verosimilitud_y_L-Momentos_en_el_Analisis_de_Frecuencias_en_la_Cuenca_Alta_del_Rio_Magdalena
- [22] Murray, R. and Larry, J., Estadística, Cuarta Edición, 2009.

J.C. García-Espinosa, es Ing. Civil por la Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador en 2004, actualmente es presidente del Colegio de Ingenieros Civiles de Loja-Ecuador y estudiante de Maestría en Recursos Hídricos, UTPL, Loja-Ecuador. Ha trabajado en entidades estatales, entre ellas la Secretaria del Agua Ecuador, SENAGUA.
ORCID: 0000-0002-6197-4592

H. Benavides-Muñoz, es Dr. en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente por la Universidad Politécnica de Valencia, España. Profesor titular principal de la Universidad Técnica Particular de Loja – UTPL, Ecuador. Director del Departamento de Geología, Minas e Ingeniería Civil. Su línea de investigación es la gestión de sistemas fluido – dinámicos, en el ciclo del agua, urbanos y rurales. Es autor de varias publicaciones científicas relacionadas con la gestión y aprovechamiento del recurso hídrico.
ORCID: 0000-0001-7075-0905



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN

FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Medio Ambiente

Oferta de Posgrados

Especialización en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos
Especialización en Gestión Ambiental
Maestría en Ingeniería Recursos Hidráulicos
Maestría en Medio Ambiente y Desarrollo
Doctorado en Ingeniería - Recursos Hidráulicos
Doctorado Interinstitucional en Ciencias del Mar

Mayor información:

E-mail: acma_med@unal.edu.co

Teléfono: (57-4) 425 5105