

2022 |

INGENIERÍA
HIDRÁULICA Y AMBIENTAL



Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, CUJAE
Revista científica del Centro de Investigaciones Hidráulicas

ISSN 2788-6050, RNPS 2066

04
XLIII

La revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental tiene el propósito de divulgar el conocimiento y contribuir al intercambio de experiencias y la comunicación entre los profesionales y técnicos de habla española. Los temas de interés para la revista incluyen contenidos en la solución de problemas, aplicaciones y desarrollo de la ingeniería hidráulica.

Editor-Director

Dr. José Bienvenido Martínez Rodríguez

Consejo Editorial

Dra. Maray Garrido Monagas (*Directora*)

Dra. Haydee Llanusa Ruiz (*Secretaria de la publicación*)

Dr. Yoermes González Haramboure

Dr. Rafael Pardo Gómez

Dr. Norberto Marrero De León

Dr. Alcides Juan Felipe León Méndez

Dr. Armando Hernández Valdés

Consejo Asesor

Damir Brjanovic, *Instituto UNESCO-IHE, Holanda*

Daniel Prats Rico, *Universidad de Alicante, España*

Joaquín Moreno Caselles, *Universidad Miguel Enrique de Elche, España*

Nahún García Villanueva, *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México*

Raúl Lopardo, *Instituto Nacional del Agua, Argentina*

Alejandro López, *Laboratorio Nacional de Hidráulica, Santiago de Chile*

Jaime Iván Ordóñez, *Universidad Nacional de Colombia, Colombia*

Rafael Guarga Ferro, *Instituto de Mecánica de Fluidos e Ingeniería Ambiental, Uruguay*

Abrahán López, *Universidad Francisco de Miranda, Venezuela*

Miguel A. Perozo Ynestroza, *Universidad Francisco de Miranda, Venezuela*

Cristóbal Díaz Morejón, *Ministerio de Ciencia Tecnología y Mediaambiente (CITMA), Cuba*

Alina Hernández Tur, *Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH), Cuba*

Rafael Feitó Olivera, *Unión Nacional de Arquitectos e Ingenieros de Cuba (UNAICC), Cuba*

Julián Herrera Puebla, *Instituto de Investigación de Riego, Cuba*

Lorenzo E. Camejo Barreiro, *Universidad de Ciego de Ávila, Cuba*

Alfonso Suárez Reytor, *Universidad de Oriente, Cuba*

Eric Cabrera Estupiñán, *Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Ecuador*

Luis Córdova López, *Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría" (CUJAE), Cuba*

Yoel Martínez González, *Instituto Superior de Ciencias y Tecnologías Aplicada, Cuba*

Ronnie Torres Hugues, *Centro de Servicios Técnicos de Ingeniería y Tecnología de la Construcción, Cuba*

Ifraín Osa Bernal, *HELVEX, Cuba*

Eduardo López Bastida, *Universidad de Cienfuegos, Cuba*

Javier Orccosupa, *Universidad Tecnológica del Perú, Perú*

Natividad Ramírez Ramírez, *Universidad de Guanajuato, México*

Carlos M. López Vázquez, *Instituto UNESCO-IHE, Holanda*

Julio Iván González Piedra, *Universidad de La Habana, Cuba*

Carlos Javier Fernández de Córdova Webster, *Universidad del Azuay, Ecuador*

Lamberto Alvarez Gil, *Universidad Central de Las Villas (UCLV), Cuba*

Felicita González, *Instituto de Investigación de Riego, Cuba*

Enrique Cisneros, *Instituto de Investigación de Riego, Cuba*

01	RICARDO VINICIO ABRIL SALTOS ESTHER MARIANELLA GILER JARAMILLO HEIDI MARIVEL GUEVARA SALAN JOCELYNE PAMELA MORALES REA JENNY AMPARO CASTRO SÁNCHEZ MARÍA GABRIELA VARGAS ÁLVAREZ ELCY JIMENA REVELO BENAVIDES TATIANA YESSSENIA VILLACIS PANTOJA	CARACTERIZACIÓN DE CAPTACIONES DE AGUA EN PUYO, PASTAZA	3 12
02	ANDREA CAROLINA BELTRÁN CONLAGO RICARDO VINICIO ABRIL SALTOS EDWIN RICARDO PAREDES CEPEDA	INFLUENCIA DE LA COBERTURA VEGETAL EN LAS CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS DEL RÍO PINDO	13 26
03	RIGOBERTO MORALES HERNÁNDEZ MANUEL ALEJANDRO AMADOR NÚÑEZ INGRID FERNÁNDEZ LORENZO VIVIAN BEATRIZ ELENA PARNÁS	VALIDACIÓN DEL MODELO EN CFD DE UNA NAVE ANTE CARGAS DE VIENTO CON ANÁLISIS ESTACIONARIO	27 37
04	JUAN DAVID RINCÓN VANEGAS	FLUJO NO LINEAL PERMANENTE EN ACUÍFEROS CONFINADOS Y LIBRES EN PRESENCIA DE DESARROLLO	38 46
05	YASET MARTÍNEZ VALDÉS FÉLIX RIAÑO VALLE LIZ ACOSTA CABALLERO	DETERMINACIÓN DEL DIÁMETRO ECONÓMICO DE UNA TUBERÍA DE IMPULSIÓN DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD (PEAD)	47 61
06	ROXANA AYMÉE LUIS WINOGRAD ROBIER HERNÁNDEZ BARBOSA PABLO ENRIQUE CÁRDENAS QUIÑONES	DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE RESIDUALES DE LA EMPRESA AGROINDUSTRIAL AZUCARERA 30 DE NOVIEMBRE	62 75
07	NURIA DE LOS ÁNGELES VAILLANT LÓPEZ GABRIELA CARRERAS FERNÁNDEZ GUILLERMO RIBEAUX KINDELÁN	EFFECTOS DEL CAMPO MAGNÉTICO EN LA DUREZA TOTAL, CALOR ESPECÍFICO Y PUNTO DE EBULLICIÓN DEL AGUA	76 87

Caracterización de captaciones de agua en Puyo, Pastaza

Ricardo Vinicio Abril Saltos

E-MAIL: rvabril@uea.edu.ec

Docente Universidad Estatal Amazónica, Carrera de Ingeniería Ambiental.

Esther Marianella Giler Jaramillo

E-MAIL: marianellagiler.sd@hotmail.com

Profesional independiente

Heidi Marivel Guevara Salan

E-MAIL: heidima1996@gmail.com

Profesional independiente

Jocelyne Pamela Morales Rea

E-MAIL: jocelyne_pamela92@hotmail.com

Profesional independiente

Jenny Amparo Castro Sánchez

E-MAIL: jennykstr@gmail.com

Profesional independiente

María Gabriela Vargas Álvarez

E-MAIL: gabrielavargas_94@hotmail.com

Profesional independiente

Elcy Jimena Revelo Benavides

E-MAIL: menalove66@gmail.com

Profesional independiente

Tatiana Yessenia Villacis Pantoja

E-MAIL: tatianita94@outlook.es

Asesora turística ambiental Resort Cabaña Amazónica

RESUMEN

Este trabajo se desarrolló en la provincia de Pastaza, su objetivo: Determinar la incidencia del uso del suelo en las características hidroedafológicas en las captaciones Apangora y Kotococha, Huagrayacu y San Jacinto. Se determinó el área de recarga, se establecieron puntos para muestreo de suelo y pruebas de infiltración, se determinaron en el suelo los contenidos de materia orgánica, carbono, humedad, densidad aparente y de raíces. Se reportaron las diferencias estadísticas para el uso de suelo con respecto a la mayoría de parámetros, donde el mosaico, reportó mayor concentración de carbono y mayor velocidad de infiltración, también hubo correlaciones entre las características de la zona de recarga y el caudal. Se concluye que el tipo de uso de suelo, influye en la velocidad de infiltración y el contenido de humedad.

Palabras Claves: cobertura, infiltración, materia orgánica, raíces, recarga hídrica.

Characterization of water catchments in Puyo, Pastaza

ABSTRACT

This work was developed in the province of Pastaza, its objective: To determine the incidence of land use in the hydrodaphological characteristics in the Apangora and Kotococha, Huagrayacu and San Jacinto catchments. The recharge area was determined, points were established for soil sampling and infiltration tests, the contents of organic matter, carbon, moisture, apparent density and roots were determined in the soil. Statistical differences were reported for land use with respect to most parameters, where the mosaic reported higher carbon concentration and higher infiltration speed, there were also correlations between the characteristics of the recharge zone and the flow. It is concluded that the type of land use influences the infiltration rate and the moisture content.

KEYWORDS: coverage, infiltration, organic matter, roots, hydric recharge

01 INTRODUCCIÓN

El ciclo del agua y la cobertura vegetal, están relacionados a través de la “conectividad hidrológica”, en esta se interrelacionan los flujos de agua, los ecosistemas y las cuencas, tienen una estrecha relación con los terrenos adyacentes. (Valencia y Tobón 2017). Las zonas de recarga de las cuencas hídricas, se ven afectadas por las variaciones de precipitaciones, pero también por los cambios en el uso del suelo, donde la cobertura vegetal, influye en los procesos hidrológicos (Abril et al. 2019)

Los incrementos en la cobertura arbórea disminuyen la escorrentía y el potencial de erosión hídrica, lo que contribuye a incrementar la infiltración del agua en el suelo, favoreciéndose de este modo la disponibilidad de agua para las plantas y mejora la recarga hídrica (Ríos et al. 2013). La recarga hídrica depende del régimen de precipitación, de la escorrentía superficial y del caudal de los ríos, así como de la permeabilidad de los suelos, de su contenido de humedad, de la duración e intensidad de la lluvia y del patrón de drenaje de la cuenca. También la pendiente de la superficie constituye un factor importante, puesto que los terrenos muy inclinados favorecen la escorrentía superficial; por el contrario, los terrenos con poca pendiente retienen por más tiempo el agua, lo que favorece la infiltración.

El presente trabajo, se desarrolló en la provincia de Pastaza en el año 2018, buscó comparar zonas de recarga hídrica con diferente extensión y cobertura y planteó como objetivo: determinar la incidencia del uso del suelo en las características hidroedafológicas en las captaciones Apangora, Huaguayacu, San Jacinto y Kotococha.

02 MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo se realizó en la provincia de Pastaza, cantón Pastaza, comunidades Kotococha, Huaguayacu y San Jacinto ubicadas en la parroquia Tarqui, y en la comunidad Apangora que se encuentra en la parroquia Puyo (figura 1). En la zona la temperatura oscila entre 19°C y 23°C, con una precipitación promedio anual es de 4562 mm, siendo un clima cálido húmedo por la presencia de la selva que mantiene una humedad relativa alta de 87,8% (Naranjo 2014).

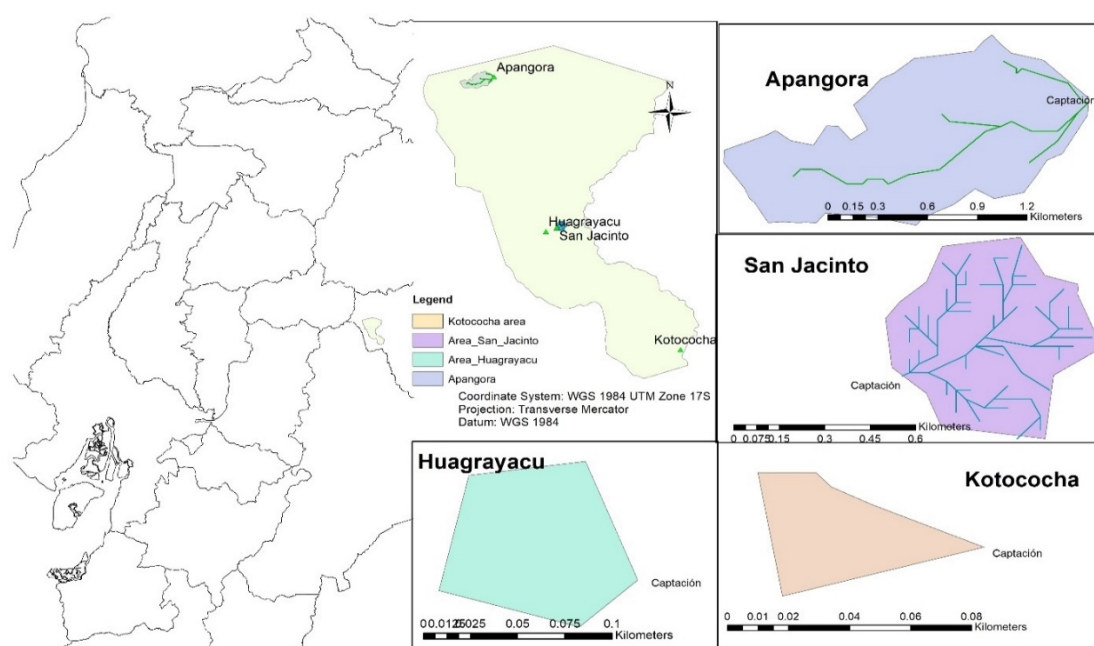


Figura 1. Mapa de ubicación de las zonas de recarga

Se identificaron las coordenadas de las captaciones de agua con un GPS marca GARMIN modelo Etrex, sus coordenadas proyectadas en sistema WGS 84 zona 17 (Apangora) y 18 (San Jacinto, Huagrayacu y Kotococha) se muestran en la tabla 1, así como también las características de uso de suelo. Se distribuyeron aleatoriamente los sitios para el desarrollo de las pruebas de infiltración, considerando las diferentes coberturas de suelo existentes en cada zona de recarga, desarrollándose nueve en la toma de captación Apangora (siete en cobertura de mosaico y 2 en cobertura de pasto), siete en la toma de captación Kotococha (cuatro en cobertura de pasto y 3 en cobertura mosaico) ocho en la toma de captación de Hugrayacu (seis en cobertura bosque de recambio y dos en pasto) y nueve en la de San Jacinto (cobertura de bosque de recambio).

Con el uso de modelos digitales de terreno, se delimitó el área de la zona de recarga hídrica a través de la herramienta Hidrology de Arc Map.

Tabla 1. Ubicación de las tomas de captación

Captación	Coordenadas UTM		Altura (m.s.n.m)	Áreas por uso de suelo (%)		
	X	Y		Bosque	Mosaico	Pasto
Apangora	831394	9840857	1168	0%	43%	57%
San Jacinto	167731	9830466	918	100%	0%	0%
Huagrayacu	167035	9830207	929	41%	59%	0%
Kotococha	175777	9822080	890	0%	36%	64%

Las pruebas de infiltración se realizaron con el método del cilindro simple, registrándose la lámina de infiltración a 60 y 90 minutos (Abril et al., 2019) y se determinó la velocidad de infiltración mediante la ecuación 1. Se tomaron dos muestras superficiales de suelo, en cada punto de infiltración con cilindros de dimensiones de 7,62 cm de diámetro y 5 cm de profundidad. Se determinó el contenido de carbono, densidad aparente (Bravo et al. 2017), humedad (Martínez et al. 2010) y densidad de raíces en las muestras superficiales. Se realizó un muestreo longitudinal en línea recta en dirección de la pendiente en las áreas cercanas a la toma de captación, con distancias de 10 m entre puntos y se determinó la profundidad del suelo y la humedad de este a profundidades de 0-50 cm y 50-100 cm.

$$Velocidad\ de\ infiltración = \frac{Infiltración\ acumulada}{Tiempo\ acumulado} \quad (1)$$

Se realizaron monitoreos de caudal y de calidad de agua. Se registraron los parámetros: saturación de oxígeno, pH, temperatura, conductividad a través de un medidor multiparamétrico HACH, y en laboratorio se determinó: turbidez, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos y sólidos disueltos (Rice et al. 2012).

La densidad de raíces se determinó por medio de las muestras de suelo, las cuales se sometieron en la estufa a 105°C por 24 horas, transcurrido el tiempo se sacan las raíces de la muestra de suelo, estas se cuantifican y se miden los brotes y se determina la longitud de raíces a través de la fórmula de Newman (Pire 1995).

Para medir el caudal se utilizó el método de aforo volumétrico (ecuación 2) en la captación de Kotococha y Hugrayacu, para lo cual se requiere de un recipiente o un lugar con volumen conocido y a través de la ecuación de Maning para el caso de Apangora y San Jacinto. (ecuación 3 y ecuación 4), el coeficiente de rugosidad se determinó a través de la ecuación de Bray (ecuación 5) (Abril et al. 2019).

$$Q = \frac{V}{t} \quad (2)$$

Donde:

Q = Caudal en m^3/s

V = volumen

T = tiempo

$$v = \left(\frac{1}{n}\right) * Rh^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$Q = v.A \quad (4)$$

$$n = 0,0495 * (D_{50})^{0,16} \quad (5)$$

Donde: v = velocidad en m/s , n = coeficiente de rugosidad (adimensional), Rh = Radio hidráulico, S = pendiente, A = Área (m^2), Q = caudal m^3/s , (D_{50}) = diámetro en metros de las piedras que ocupan 50% del lecho.

Se realizó un análisis de varianza para la velocidad de infiltración y características del suelo entre los diferentes usos de suelo, donde la variable independiente fue la cobertura vegetal presente en las parcelas, y las dependientes la velocidad de infiltración, densidad aparente, densidad de raíces, contenido de carbono, materia orgánica y humedad, los datos fueron procesados con el software Insfostat v.2020.

Con la finalidad de conocer el grado de correlación entre los parámetros hidroedafológicos evaluados y también de las características de la cuenca, con el caudal, oxígeno disuelto, pH, turbidez, sólidos suspendidos y disueltos, se realizó un análisis de correlación R^2 de Pearson con el software SPSS v22.

03 RESULTADOS

Las áreas de recarga, presentan diferentes características en cuanto a su extensión, perímetro, longitud del cauce y pendiente (tabla 2), donde el área de recarga Apangora es la que muestra una mayor extensión, perímetro y longitud del cauce, mientras que la de Kotococha es la más pequeña con respecto a las medidas mencionadas, sin embargo es la que mayor pendiente presenta.

Tabla 2. Características topográficas de la zona de recarga

Medida	Apangora	San Jacinto	Huagrayacu	Kotococha
Área (m^2)	1152468	333 692	6870	45751
Perímetro (m)	3 800	2 298	320	200
Longitud del cauce (m)	2062	676	10	6
Pendiente (%)	13	2.2	10.3	25

El muestreo con barrena realizado transversalmente, mostró que los suelos de la comunidad Apangora, presentan una profundidad promedio de 0,85 m, encontrándose en tres puntos a partir de los 0,5 m un lecho de piedra y en dos puntos a partir de los 80 cm se encuentra capas de arena. La captación Kotococha, presenta profundidad promedio de 0,93 m sin presencia de lecho rocoso en los puntos monitoreados. Las captaciones de San Jacinto y Huagrayacu, presentan profundidades de suelo de más de 1 m.

En las características del suelo (tabla 3), observamos que el área de recarga de la captación Apangora, es la que presenta mayor densidad aparente, velocidad de infiltración a los 60 y 90 minutos, y a su vez es la que reporta menor densidad de raíces y humedad superficial, la zona de recarga de San Jacinto es la que presenta mayor contenido de carbono y materia orgánica.

Tabla 3. Estadísticos de las características del suelo

	Variable	Densidad Aparente del suelo g/cm ³	Velocidad infiltración 60 min cm/min	Velocidad infiltración 90min cm/min	Densidad de raíces Cm/cm ³	Humedad superficial %	Materia Orgánica %	Carbono %	Humedad 0-50 cm %	Humedad 50-100 cm %
Apangora	Media	1,95	6,54	4,40	0,44	0,33	0,26	0,15	0,55	0,50
	D.E.	0,14	6,30	2,91	0,20	0,03	0,07	0,04	0,07	0,08
	Mín.	1,74	0,50	0,47	0,19	0,26	0,12	0,07	0,44	0,40
	Máx.	2,16	20,50	9,20	0,75	0,37	0,33	0,19	0,64	0,63
Huagrayacu	Media	1,01	0,13	0,11	0,66	0,69	0,43	0,25	0,61	0,59
	D.E.	0,20	0,12	0,10	0,29	0,05	0,08	0,05	0,03	0,08
	Mín.	0,65	0,01	0,01	0,43	0,59	0,27	0,16	0,55	0,42
	Máx.	1,22	0,38	0,29	1,25	0,72	0,52	0,30	0,64	0,65
Kotococh	Media	1,36	0,58	0,63	1,11	0,56	0,16	0,09	0,45	0,42
	D.E.	0,22	0,40	0,23	0,51	0,08	0,05	0,03	0,04	0,05
	Mín.	1,16	0,06	0,29	0,20	0,46	0,09	0,05	0,40	0,36
	Máx.	1,71	1,06	0,80	1,78	0,64	0,24	0,14	0,52	0,51
San Jacinto	Media	1,13	0,51	0,37	1,17	0,68	0,65	0,38	0,53	0,46
	D.E.	0,14	0,30	0,20	0,44	0,06	0,04	0,02	0,05	0,06
	Mín.	0,94	0,12	0,11	0,73	0,58	0,60	0,35	0,44	0,37
	Máx.	1,36	0,93	0,70	1,93	0,76	0,72	0,42	0,59	0,56

D.E. Desviación Estándar, Mín. Mínimo, Máx. Máximo

La tabla 4 muestra el análisis de varianza y los resultados de la prueba de comparación de medias de Duncan para las diferentes características del suelo, donde se reportaron diferencias significativas para $p \leq 0,05$ para la velocidad de infiltración a los 60 minutos y en el resto de parámetros se reportaron diferencias significativas para $p \leq 0,01$. A excepción de la humedad superficial, que reportó su mayor valor en la cobertura de bosque, en el resto de parámetros, se reportaron mayores valores en el uso de suelo mosaico. La humedad de suelo a profundidad de 0 a 50 y 51 a 100 cm, no reportaron diferencias significativas para $p \leq 0,05$.

Tabla 4. Análisis de varianza y prueba de comparación de medias de Duncan de las características del suelo

Medida	Unidad	valor de p	Cobertura de suelo		
			Bosque	Pasto	Mosaico
Densidad aparente	g/cm ³	<0,0001	1,09c	1,36b	1,65 a
Velocidad de infiltración a los 60 min	cm / min	0,0139	0,31b	1,06b	4,06 a
Velocidad de infiltración a los 90 min.	cm / min	0,0006	0,23b	0,81b	2,75 a
Densidad de raíces	Cm /cm ³	0,0088	0,69b	0,81 a	0,94 a
Humedad superficial	%	<0,0001	0,83 a (68,9%)	0,72b (51,8%)	0,65c (42,3%)
Materia Orgánica	%	<0,0001	0,44c (19,4%)	0,51b (26,0%)	0,74 a (54,8%)
Carbono	%	<0,0001	0,34c (11,6%)	0,39b (15,2%)	0,56 a (31,4%)

Los valores entre paréntesis indican valor real previo a transformación con función raíz cuadrada. a, b, c: valores con letras comunes no difirieron para $p < 0,05$ (Duncan 1955).

La tabla 5, muestra que la humedad superficial en el suelo, presenta correlaciones al 0,01 con la densidad de raíces finas, a la vez de reportar relaciones inversas con el contenido de carbono, materia orgánica y la densidad aparente del suelo. El contenido de carbono tiene correlación directa con la materia orgánica y la densidad aparente e inversa con la concentración de raíces finas. Esta, a su vez también presenta correlaciones inversas con la concentración de materia orgánica y la densidad aparente. Las velocidades de infiltración a los 60 y 90 minutos, presentan correlaciones inversas con el contenido de carbono y la densidad de raíces finas, y la velocidad de infiltración presenta una correlación inversa con la humedad superficial del suelo.

La tabla 6, muestra la caracterización de los muestreos de agua realizados entre octubre y diciembre del 2018, donde podemos observar que se registran mayores valores de caudal en la captación de Apangora, con una media de 211,7 l/s, lo cual puede deberse a una mayor área de recarga y longitud del cauce, lo cual también influye en un menor coeficiente de variación. De la misma forma la saturación de oxígeno reporta un mayor promedio en la captación de Apangora, lo cual se debe principalmente a que el río presenta un lecho rocoso con gran cantidad de saltos y cascadas, lo que permite una mayor aireación, sin embargo, esta toma de captación es la que reporta mayor variabilidad en este parámetro. Los valores de pH y conductividad, y sólidos disueltos muestran un mayor promedio en la captación de Kotococha, mientras que la temperatura y turbidez es mayor en Apangora y la Turbidez y los sólidos suspendidos, reportan mayor valor en la captación e Huagrayacu.

Tabla 5. Análisis de correlación de Pearson R2 para características del suelo

	Carbono	Materia Orgánica	Densidad aparente	Densidad de raíces finas	Velocidad de infiltración a los 60 min	Velocidad de infiltración a los 90 min
Humedad superficial	-0,804**	-,597*	-0,870**	0,910**	-0,476	-0,562*
Carbono	1	0,847**	0,783**	-0,757**	0,577*	0,606*
Materia Orgánica		1	0,497	-0,554*	0,467	0,493
Densidad aparente			1	-0,766**	0,469	0,524
Densidad de raíces finas				1	-0,551*	-0,664*
Velocidad de infiltración a los 60 min					1	0,945**
Velocidad de infiltración a los 90 min						1

*. La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas).

*. La correlación es significativa en el nivel 0,05 (2 colas).

Tabla 6. Caracterización del muestreo de agua de las captaciones.

		caudal (litros/seg)	Saturación de Oxígeno (%)	Potencial hidrógeno (pH)	Temperatura (°C)	Conductividad (µS/cm)	Turbidez (NTU)	Sólidos suspendidos (cm ³ /litro)	Sólidos disueltos (mg/litro)
Apangora	Media	211,67	106,73	6,72	25,40	49,88	1,43	0,70	57,00
	CV	39,27	16,35	6,33	10,97	11,17	66,79	89,21	14,36
	Mín.	135,00	93,10	6,28	23,10	45,10	0,65	0,20	48,00
	Máx.	300,00	126,40	7,13	28,50	56,00	2,49	1,40	64,00
Huagrayacu	Media	0,20	92,85	6,13	22,38	23,65	3,63	3,81	32,00
	CV	140,72	16,70	4,08	11,76	22,18	107,56	98,09	27,83
	Mín.	0,00	76,00	6,00	19,00	19,20	1,00	0,40	24,00
	Máx.	0,60	110,10	6,50	25,00	31,00	9,40	8,81	42,00
Kotococha	Media	0,48	96,73	7,49	23,70	84,40	1,33	0,98	54,00
	CV	89,44	3,34	3,82	8,96	73,72	47,08	125,44	65,87
	Mín.	0,00	94,00	7,11	22,00	24,80	0,58	0,20	5,00
	Máx.	1,05	100,70	7,80	26,50	170,40	1,95	2,80	89,00
San Jacinto	Media	6,93	102,83	7,33	21,15	25,88	2,46	1,30	34,00
	CV	20,20	17,07	2,68	5,60	17,87	54,67	45,72	24,13
	Mín.	6,00	83,30	7,15	20,30	20,40	1,26	0,80	24,00
	Máx.	9,00	125,80	7,51	22,90	31,70	4,39	2,10	44,00

CV: Coeficiente de variación *Min.*: Mínimo *Máx.*: Máximo

El análisis de correlación de Pearson entre las características de la cuenca y los parámetros de muestreo de agua, reportan que existen correlaciones significativas al 0,01 entre la longitud del cauce y el área de la zona de recarga. El caudal reporta correlaciones significativas al 0,05 con el área de la zona de recarga y la longitud del cauce, mientras que el oxígeno disuelto la presenta con el perímetro de la cuenca.

Tabla 7. Análisis de correlación de Pearson R2 entre características de la cuenca y muestreo de agua

	Perímetro de la zona de	Longitud del cauce	Pendiente	Caudal	Saturación de oxígeno	pH	Temperatura	Conductividad	Turbidez	Sólidos suspendidos	Sólidos disueltos
Área de la zona de recarga	0,949	0,998**	-0,156	0,969*	0,894	-,070	0,665	-0,013	-0,496	-0,570	0,557
Perímetro de la zona de recarga	1	0,966*	-0,416	0,846	0,955*	0,019	0,400	-0,210	-0,383	-0,564	0,339
Longitud del cauce		1	-0,217	0,955*	0,906	-0,074	0,616	-0,067	-0,461	-0,556	0,508
Pendiente			1	0,013	-,279	0,264	0,593	0,927	-0,571	-0,258	0,712
Caudal				1	0,766	-0,199	0,806	0,080	-0,487	-0,477	0,641
Saturación de oxígeno					1	0,312	0,390	0,006	-0,592	-0,776	0,463
pH						1	-0,103	0,580	-0,682	-0,766	0,348
Temperatura							1	0,565	-0,653	-0,444	0,895
Conductividad								1	-0,808	-0,583	0,816
Turbidez									1	0,936	-0,913
Sólidos suspendidos										1	-0,741
Sólidos disueltos											1

** . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas).

* . La correlación es significativa en el nivel 0,05 (2 colas).

05 DISCUSIÓN

Los resultados de infiltración, concuerdan con lo expuesto por Abril et al. (2019) en estudios realizados en la zona, donde se reportan velocidades de infiltración entre 0,13 y 0,55 cm /min. Las velocidades de infiltración y el contenido de humedad superficial son afectadas de forma diferente por la cobertura del suelo, una cobertura de mosaico, donde existe mezcla entre árboles y pasto, permite una mayor velocidad de infiltración, pero a su vez el movimiento vertical del agua conlleva a que se presente menor humedad superficial del suelo. Esto concuerda de forma parcial con (Jaramillo Y Chávez 1999), ya que plantean que el cambio de uso de suelo de bosques a cultivos intensivos, presenta influencias en la disminución de retención y movimiento del agua en el suelo, cumpliéndose esto solo para el caso de la humedad superficial, la cual presenta mayor porcentaje en el uso del suelo Bosque. Martinez et al. (2010), plantean que los sitios con mayor cantidad de árboles, presentan menor pérdida de humedad en las épocas secas y menor incremento de humedad en épocas lluviosas, a su vez sitios con pendiente más pronunciada tienen mayor pérdida de humedad en épocas secas y mayor incremento de humedad en épocas lluviosas.

Para las concentraciones de materia orgánica y carbono, Serrano et al. (2014) plantean en comparaciones con diferentes tipos de coberturas que las zonas abandonadas pueden presentar mayores concentraciones de materia orgánica que las repoblaciones forestales, lo cual también se observa en la cobertura de suelo mosaico.

Las características de la zona de recarga, influyen en el caudal y la saturación de oxígeno. Abril et al., (2019), reportan mayores caudales en ríos con zonas de recarga más grandes, pero a su vez estos presentan menor coeficiente de variación en diferentes épocas del año, reportando este parámetro también una correlación significativa al 0,01 con la velocidad de infiltración a una hora, en el presente trabajo, la zona de recarga de la captación Apangora, fue la que mostró mayor velocidad de infiltración a los 60 minutos y es la segunda con menor coeficiente de variación con respecto a los caudales.

06 CONCLUSIONES

Las cuatro captaciones, presentan diferentes tipos de cobertura, donde la cobertura de mosaico, reporta mejores resultados en todas las medidas a excepción del contenido de humedad superficial.

El contenido de carbono tiene influencia en características como la humedad del suelo y la velocidad de infiltración, a su vez estas dos últimas variables son interdependientes.

El área, perímetro y longitud del cauce influyen en el caudal y la saturación de oxígeno en las captaciones estudiadas.

RECONOCIMIENTO

Se realiza un especial reconocimiento al personal del Gobierno Descentralizado Provincial de Pastaza y al personal de laboratorio de la Universidad Estatal Amazónica, por las facilidades prestadas tanto para el acceso a las áreas de zona de recarga y para el análisis de las muestras de suelo y agua.

07 REFERENCIAS

- Abril R., Yanez Y., Villarroel C., Idrovo I., Caicedo E., Vargas M., Tapia A., and Valle M.** (2019). "Influence of land use and geomorphology on the flow of the Pindo River, Ecuador". *Journal of Environmental Hydrology*. vol 27 Paper 9 pp.1-19. ISSN: 1058-3912. International Association for Environmental Hydrology. San Antonio
- Bravo C., Ramírez A., Marín H., Torres B., Alemán R., Torres R., Navarrete H. y Changoluisa D.** (2017). "Factores asociados a la fertilidad del suelo en diferentes usos de la tierra de la Región Amazónica Ecuatoriana". *Revista Electrónica Veterinaria*, vol 18 no11,6-12. ISSN: 1695-7504. Veterinaria Organización, Málaga.
- Jaramillo A. y Chaves B.** (1999). "Aspectos hidrológicos en un bosque y en plantaciones de café (*Coffea arabica* L.) al sol y bajo sombra". *Revista Cenicafe*. Vol 50, p. 97-105. ISSN: 0120 – 0178. Centro Nacional de investigaciones del café. Manizales
- Martínez F., Sosa F. y Ortiz J.** (2010). "Comportamiento de la humedad del suelo con diferente cobertura vegetal en la Cuenca La Esperanza". *Tecnología y ciencias del agua*, vol 1, no4, p. 89-103. ISSN: 2007-2422. Instituto mexicano de Tecnologías del Agua, Morelos.
- Naranjo C.** (2014). "Anuario meteorológico". Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), No. 51- 2011 extraído de: <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/meteorologicos/Am%202011.pdf>
- Pire R.** (1985). "Densidad longitudinal de raíces y extracción de la humedad en un viñedo del Tocuyo-Venezuela". *Agronomía Tropical*, vol 35, no1-3, p. 5-20. ISSN: 0002-192X. Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas INIA de Venezuela, Maracay.
- Rice E., Baird R., Eaton A. and Clesceri L.** (2012). "Standard methods for the examination of water and wastewater", 22nd Ed., ISBN-13: 978-0875530130, American Public Health Association, American Water Works Association, Washington, USA
- Ríos N., Cárdenas A., Andrade H., Ibrahim M., Jiménez F., Sancho F., Ramírez E., Reyes B. y Woo A.** (2013). "Escorrentía superficial e infiltración en sistemas ganaderos convencionales y silvopastoriles en el trópico subhúmedo de Nicaragua y Costa Rica". En *Agroforestería en las Américas* no45, p. 66-71. ISSN, 1022-7482. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Turrialba.
- Serrano P., Nadal E. y Lana N.** (2014). "La relación suelo-vegetación y su influencia en el comportamiento hidrológico de diferentes ambientes vegetales". *Geoecología, cambio ambiental y paisaje: homenaje al profesor José María García Ruiz*. ISBN: 978-84-617-3212-8 978-84-96487-83-3 Universidad La Rioja, Logroño
- Valencia J. y Tobón C.** (2017). "Influencia de la vegetación en el funcionamiento hidrológico de cuencas de humedales de alta montaña tropical". *Ecosistemas*, vol. 26, no2, p.10-17. ISSN: ISSN 1697-2473. Asociación española de ecología terrestre, Madrid.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Ricardo Vinicio Abril Saltos

<https://orcid.org/0000-0003-1544-4360>

Realizo contribuciones en Idea original, dirección, redacción, análisis e interpretación de resultados, discusión

Esther Marianella Giler Jaramillo. <https://orcid.org/0000-0002-8229-8335>

Realizo contribuciones en la recolecta de datos, búsqueda de información

Heidi Marivel Guevara Salan. <https://orcid.org/0000-0003-4138-0970>

Realizo contribuciones en la recolecta de datos, búsqueda de información

Jocelyne Pamela Morales Rea <https://orcid.org/0000-0002-2052-8692>

Realizo contribuciones en la recolecta de datos, búsqueda de información

Jenny Amparo Castro Sánchez <https://orcid.org/0000-0002-2592-0888>

Realizo contribuciones en la recolecta de datos, búsqueda de información

María Gabriela Vargas Álvarez <https://orcid.org/0000-0003-0045-8452>

Realizo contribuciones en la recolecta de datos, búsqueda de información

Elcy Jimena Revelo Benavides <https://orcid.org/0000-0003-1688-2514>

Realizo contribuciones en la recolecta de datos, búsqueda de información

Tatiana Yessenia Villacis Pantoja <https://orcid.org/0000-0002-9117-9629>

Realizo contribuciones en la recolecta de datos, búsqueda de información

Influencia de la cobertura vegetal en las características hidrológicas del Río Pindo

Andrea Carolina Beltrán Conlago

E-MAIL: carito11_2011@hotmail.com

Universidad Estatal Amazónica, Departamento de Ciencias de la Tierra, Pastaza, Ecuador

Ricardo Abril Saltos

E-MAIL: ricardo.abril.saltos@gmail.com

Universidad Estatal Amazónica, Departamento de Ciencias de la Vida, Pastaza, Ecuador

Edwin Ricardo Paredes Cepeda

E-MAIL: erpc_riky2004@yahoo.es

Contraloría General del Estado, Pastaza, Ecuador

RESUMEN

La presente investigación fue realizada en la cuenca alta del río Pindo, cantón Mera, provincia de Pastaza. El objetivo fue evaluar la influencia del tipo de cobertura en las características edafológicas e hidrológicas que influyen en la variabilidad del caudal del Río Pindo. Los datos se recolectaron, utilizando el método de cilindro infiltrómetro simple. Se comparó el comportamiento de la infiltración en la cobertura de bosque y pasto, adicionalmente se extrajo una muestra de suelo mediante el método del cilindro (MC), para determinar la densidad aparente, textura del suelo y densidad de raíces. Los resultados mostraron que, la velocidad de infiltración y densidad longitudinal de raíces no presentan diferencias significativas entre bosque y pasto. Del análisis de la densidad aparente los pastos presentaron los mayores valores promedio.

Palabras Claves: bosque, caudal, pasto, uso de suelo.

Influence of vegetation cover on the hydrological characteristics of the Pindo River

ABSTRACT

The present investigation was carried out in the upper basin of the Pindo River, Mera canton, Pastaza province. The objective was to evaluate the influence of the type of cover on the edaphological and hydrological characteristics that influence the variability of the Pindo River flow. Data were collected using the simple infiltrometer cylinder method. The infiltration behavior in the forest and grass cover was compared, additionally a soil sample was extracted using the cylinder method (MC), to determine the apparent density, soil texture and root density. The results showed that the infiltration speed and longitudinal density of roots do not present significant differences between forest and grass. From the analysis of the apparent density, the grasses presented the highest average values.

KEYWORDS: forest, flow, pasture, land use.

01 INTRODUCCIÓN

En el Ecuador el uso del suelo varía según la región, siendo en la Sierra andina y el Litoral, donde se localiza el mayor uso agropecuario, mientras que en la Amazonía se caracteriza por su predominio boscoso, sin embargo, a pesar de aquello se evidencia un cambio progresivo del bosque hacia usos agropecuarios. Actividades inapropiadas desarrolladas por la población en el medio ambiente, debido a la demanda de alimentos y expansión conllevan a la deforestación de los bosques siendo estos reemplazados por cultivo y pastos para la ganadería, alterando así el ciclo hidrológico. Al existir una reducción de la biodiversidad de las áreas forestales nativas de las riberas de los ríos y recursos naturales, se genera un mayor flujo hídrico en la cuenca, sin embargo, el uso de especies de crecimiento rápido en procesos de reforestación contribuye a reducir los niveles de agua liberados del bosque.

Según la FAO (2013) los bosques captan más agua en comparación con las áreas agrícolas y los pastizales, debido a que mediante los procesos de evapotranspiración aportan con un mayor índice de humedad atmosférica, además los bosques presentan suelos con una capa orgánica fina y porosa; con sistemas radicales densos y profundos aportando eficientemente a los procesos de infiltración y retención de agua, reduciendo la escorrentía superficial y recargando satisfactoriamente las aguas subterráneas, por lo que a diferencia de suelos con otros tipos de uso, retienen y absorben mayor cantidad de agua. La deforestación es la causante del aumento del caudal y riesgo de inundaciones en épocas lluviosas y su efecto inverso en épocas secas contribuyendo al aumento de las sequías.

Esta investigación tuvo como objetivo, valorar la influencia del tipo de cobertura vegetal en las características edafológicas e hidrológicas de la variabilidad del caudal de la microcuenca alta del río Pindo.

02 MATERIALES Y MÉTODOS

La cuenca alta del río Pindo se encuentra ubicada en el cantón Mera al noroccidente de la provincia de Pastaza, región Amazónica del Ecuador. La vegetación según la clasificación realizada por Sierra (1999), corresponde a un bosque siempre verde piemontano; se evidencia la presencia de bosque de realce y pastizales resultado de la actividad agrícola. El terreno presenta una topografía irregular debido a derrumbes y caída de árboles, con presencia de constantes lluvias y un alto índice de humedad. La figura 1 muestra la ubicación geográfica del área de estudio.

CARACTERÍSTICAS DEL CANTÓN MERA

El cantón Mera por sus características biofísicas y ubicación a pie de montaña de la Cordillera Oriental, constituye una fuente de agua para consumo humano, con elevadas pendientes que limitan la actividad agrícola y contenido de materia orgánica. Aspectos relevantes en cuanto a acciones de prestación de servicios eco-sistémicos, especialmente de recursos hídricos y biodiversidad.

Abril et al. (2019) indican, que las características meteorológicas en esta zona tienen una temperatura promedio de 22,6 °C y una precipitación con promedios de 5 156,72 mm (2011-2015).

La flora del cantón Mera presenta una diversidad de plantas desde herbáceas hasta árboles de tallos altos como Pilche, Chanul, Cedros, Laurel, Canelo, Sandi, María, Tamburo, Chontacspi, Guayacán, Caoba entre otros.

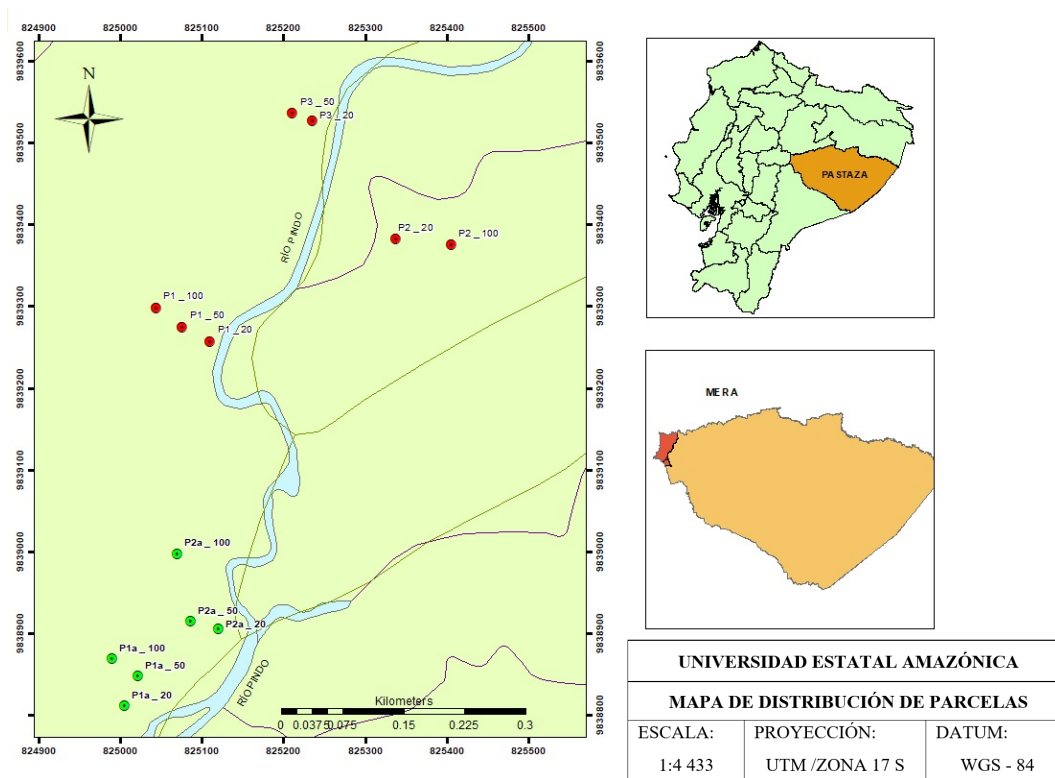


Figura 1. Ubicación geográfica de la cuenca hidrográfica Pindo.

DELIMITACIÓN DE PARCELAS

Se realizaron los muestreos en la zona de estudio ubicando parcelas al borde del río Pindo en coberturas de bosque y pasto a distancias de 20 m, 50 m, 100 m y 200 m, respectivamente, en base a los cuales se describieron las características topográficas y de vegetación, recopilándose datos in situ.

Las parcelas se delimitaron en áreas de 400 m² (20 x 20 metros), bajo un mismo sentido de pendiente entre ellas. En total se instalaron siete parcelas en cobertura de bosque y seis parcelas en coberturas de pasto, en la tabla 1 se indica la ubicación geográfica y sus coordenadas en sistema WGS84 zona 17 Sur.

Tabla 1. Ubicación de las parcelas de muestreo en el área de estudio

N°	Sector	Parcela	Distancia al río (m)	Cobertura	Coordenadas X	Coordenadas Y
1	Pindo Mirador	1	20	Bosque	825111	9839257
2	Pindo Mirador	1	50	Bosque	825077	9839275
3	Pindo Mirador	1	100	Bosque	825045	9839298
4	Pindo Mirador - Afluente	2	20	Bosque	825338	9839382
5	Pindo Mirador - Afluente	2	100	Bosque	825406	9839375
6	Pindo Mirador	3	20	Bosque	825236	9839527
7	Pindo Mirador	3	50	Bosque	825212	9839536
8	Pindo Mirador	1a	20	Pasto	825006	9838812
9	Pindo Mirador	1a	50	Pasto	825022	9838848
10	Pindo Mirador	1a	100	Pasto	824991	9838869
11	Pindo Mirador	2a	20	Pasto	825121	9838906
12	Pindo Mirador	2a	50	Pasto	825087	9838915
13	Pindo Mirador	2a	100	Pasto	825071	9838998

[Fuente: Elaboración propia]

PRUEBAS DE INFILTRACIÓN

Consistió en la prueba de cilindro infiltrómetro simple, el método se aplicó para establecer la velocidad de infiltración del suelo, para este proceso se introdujo el cilindro en el suelo a una profundidad de 10 cm a 15 cm, posterior a lo cual se registró la altura inicial de la lámina de agua y se recolectaron lecturas en periodos de 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 30, 45 y 60 minutos. La velocidad de infiltración fue establecida a través de la siguiente ecuación:

$$VI \text{ prom} = I \text{ acum} / t \quad (1)$$

Donde: *VI prom*: tasa de infiltración promedio (m); *I acum*: infiltración acumulada; *t*: tiempo (s)

PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO

Densidad aparente

Para determinar la masa de suelo seco se empleó el método del cilindro (MC), que consiste en extraer muestras del suelo utilizando un cilindro metálico, para estimar la masa de suelo seco contenida en su interior. El método consistió en introducir un cilindro de 5 cm de altura y 7 cm de diámetro, nivelando el suelo con los bordes previo a extraer la muestra, la cual se secó por 24 horas en la estufa a 105 °C hasta obtener su peso constante, para posteriormente calcular su valor aplicando la siguiente ecuación:

$$Da = \frac{Pss}{Vol^3} \quad (2)$$

Donde: *Da*: densidad aparente (gr/cc); *Pss*: peso del suelo seco (gr); *Vol*: volumen del cilindro (cc)

Textura del suelo

Para determinar la textura del suelo se utilizó el método de Bouyoucos ecuación (3)-(5), que consiste en determinar el porcentaje de partículas de arena, limo y arcilla presentes.

El método del Bouyoucos emplea un hidrómetro, instrumento que mide el asentamiento de las partículas del suelo debido a la disminución de la densidad de suspensión. En este procedimiento se utilizó un dispersante de Calgón para disgregar las partículas y estimar las proporciones de arena, limo y arcilla.

$$\% \text{ Arena} = 100 - \frac{\text{Lectura corregida a los 40 seg}}{\text{peso de la muestra (g) a } 105^{\circ} \text{ C}} \times 100 \quad (3)$$

$$\% \text{ Arcilla} = \frac{\text{Lectura corregida a las 2 h} \times 100}{\text{peso de la muestra (g) a } 105^{\circ} \text{ C}} \quad (4)$$

$$\% \text{ Limo} = 100 - (\% \text{ Arcilla} + \% \text{ Arena}) \quad (5)$$

Densidad de raíces

A través del uso de un cilindro plástico de 7 cm de diámetro por 5 cm de alto se procedió a extraer una muestra de suelo de la cual se obtienen las raíces presentes. En una hoja milimetrada se midió la longitud de las raíces principales y secundarias, y se determinó el número de nodulaciones presentes. Para obtener los totales de cada muestra se realizó una sumatoria de la longitud de raíces y del número de modulaciones.

Para estimar la longitud de raíces, se utilizó la fórmula de Newman (1965) ecuación (6).

$$R = \frac{\pi \times N \times A}{2 H} \quad (6)$$

Dónde: R : longitud de raíces (cm); N : número de intercepciones; A : Área de la superficie donde están distribuidas las raíces (cm²); H : longitud total de las líneas de referencia (cm)

El volumen de la muestra se determina considerando el diámetro interno de 7 cm y la altura de 5 cm, con la ecuación (7).

$$V = \frac{\pi r^2}{2} \quad (7)$$

Dónde: V : Volumen (cm³)

Por último, la densidad longitudinal de raíces fue determinada por la ecuación (8).

$$Lx = \frac{\text{Longitud de raíces}(R)(cm)}{\text{Volumen de la muestra}(V)(cm^3)} \quad (8)$$

El tipo de cobertura estimó datos in situ con el objetivo de verificar el porcentaje de área cubierta a nivel de dosel y sotobosque, los datos fueron tomados donde se realizó la prueba de infiltración y adicional se ubicaron cuatro subparcelas aleatorias de 2 m x 2 m con el fin de obtener un valor promedio de cada parcela. Los datos fueron recolectados mediante el uso de la APP Canopy Cover Free versión 1.03 diseñada para dispositivos móviles Android. El software calcula automáticamente la cobertura a partir de la zona verde, lo cual fue una lectura válida para sotobosque a diferencia de dosel que debido a la altura de cobertura y acción de la luz el software únicamente identifica los espacios libres de cobertura siendo necesario restar del dato obtenido el 100% para determinar su valor.

Para determinar la correlación existente entre las variables cuantitativas, los datos fueron procesados con el software SPSS (IBM 2013), con el cual se estableció los estadísticos descriptivos y se realizó un análisis de correspondencia múltiple (figura 3) y un análisis de correlación de Pearson R^2 con las variables no categóricas, para el análisis del coeficiente de variación de la variable caudal (tabla 9).

Cabe señalar, que previo el análisis, todos los valores porcentuales de cobertura de sotobosque y cobertura de dosel, fueron convertidos en base a la función raíz cuadrada.

ESTIMACIÓN DE BIOMASA E IDENTIFICACIÓN DE ESPECIES

Con la ayuda de un experto botánico se realizó la identificación de especies in situ con diámetro a la altura del pecho (DAP) mayor o igual a 10 cm, distribuidos en cinco clases diamétricas e igualmente se registró la altura (m) para determinar la predominancia de especies y su heterogeneidad a nivel de dosel en cada parcela. Los grupos, según su distribución diamétrica se clasificaron en: grupo 1 de 10 cm a 20 cm; grupo 2 de 20,1 cm a 30 cm; grupo 3 de 30,1 cm a 40 cm; grupo 4 de 40,1 cm a 50 cm y grupo 5 mayores a 50 cm.

Para el caso de árboles ramificados en la base inferior a la altura del pecho se tomó la medida bajo la división del tronco.

Factores ambientales

Precipitación

Los valores de la precipitación fueron descargados de la base de datos de la estación meteorológica del Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial de Pastaza, ubicado en la estación Biológica Pindo Mirador.

Caudal

Para la determinación de caudales se utilizó el método de velocidad / superficie, mismo que depende de dos factores como son la velocidad media de la corriente y el área de sección transversal del canal, que se calcula mediante la ecuación (9)

$$Q = A \times V \quad (9)$$

Donde: Q: caudal (m³/s); A: área de mojado (m²); V: velocidad (m/s)

La unidad métrica de caudal se expresa en m³/s, no obstante, si la corriente es menor se puede expresar en L/s. Además, los factores de pendiente, rugosidad del piso y forma influyen en la velocidad de la corriente, las cuales se encuentran expresadas en la ecuación (10) de Manning.

$$V = \frac{R^{\frac{2}{3}} \times S^{\frac{1}{2}}}{n} \quad (10)$$

Donde: V: velocidad media de la corriente (m/s); R: radio hidráulico (m); S: pendiente de media del canal (m); n: coeficiente de rugosidad de Manning. (tabla 2)

R se obtiene mediante la ecuación (11).

$$R = \frac{A}{P} \quad (11)$$

Donde: A: área de la sección (m²) y P: perímetro mojado del cauce (m)

Para el coeficiente de rugosidad de Manning se asigna un valor de $n= 0,016$, tipo de cobertura en cauce, sección transversal uniforme, alineación regular sin gujarros ni vegetación, en suelos sedimentarios finos.

Se realizó un análisis de correspondencia múltiple, con el uso del software SPSS 22 a través de una reducción de dimensiones, para las variables no categóricas, e identificar como se agrupan las diferentes parcelas en función de sus características, de la misma forma se realizó un análisis de varianza con el software INFOSAT para determinar si existen diferencias significativas en cuanto a la velocidad de infiltración entre las parcelas ubicadas en el bosque y en el pasto.

03 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en función al tipo de cobertura (tabla 2) y en función a la distancia al borde (tabla 3) se describen a continuación.

Tabla 2. Medidas resumen en función del tipo de cobertura

Cobertura	Descripción	Velocidad de infiltración cm/seg ^{0.5}	Densidad aparente (gr/cm ³)
Bosque	Media	0,09	0,28
	D.E.	0,10	0,13
	Mín.	0,02	0,15
	Máx.	0,32	0,48
Pasto	Media	0,07	0,40
	D.E.	0,10	0,07
	Mín.	0,01	0,32
	Máx.	0,27	0,51

[Fuente: Elaboración propia]

Tabla 3. Medidas resumen en función de la distancia al borde del río

Distancia	Descripción	Velocidad de infiltración cm/seg ^{0.5}	Densidad aparente (g/cm ³)
20 m	Media	0,04	0,35
	D.E.	0,04	0,12
	Mín.	0,01	0,22
	Máx.	0,10	0,51
50 m	Media	0,05	0,32
	D.E.	0,03	0,12
	Mín.	0,01	0,15
	Máx.	0,08	0,41
100 m	Media	0,16	0,35
	D.E.	0,16	0,15
	Mín.	0,01	0,15
	Máx.	0,32	0,48

[Fuente: Elaboración propia]

En la tabla 2 se evidencia que la mayor velocidad de infiltración se dio en la cobertura de bosque con un valor de 0,09 cm/seg 0.5, resultado que concuerdan con González et al. (2016) que los suelos forestales presentan una velocidad muy superior a la de los suelos agrícolas, por su alto contenido de materia orgánica y los innumerables canales en el subsuelo producto de la acción de las raíces primarias y secundarias hacen más eficiente la recarga de agua hacia el suelo incrementando la infiltración. Cabe señalar que de acuerdo a la desviación estándar (tabla 3) la distancia al borde del río a los 100 m, presenta mayor dispersión frente a su valor promedio.

En cuanto a la densidad aparente los pastos presentan el valor promedio más alto (tabla 2) con un valor de 0,40 gr/cm³. Situación resultante a través del tiempo por acción del pisoteo del ganado y la subsiguiente compactación del suelo presenta una mayor densidad aparente promedio en los iniciales 40cm del perfil en comparación a las muestras tomadas en bosque con suelos de poca intervención antrópica indicando un efecto benéfico sobre su conservación y sostenibilidad, debido al contenido de materia orgánica en la capa superficial y aporte continuo de residuos orgánicos a través del tiempo.

Y en referencia al borde del río a los 100 m se cuantifica la mayor dispersión con respecto a su media aritmética, puede observarse en la tabla 3.

Tomando como referencia la composición textural del suelo, el bosque presenta una mayor permeabilidad debido al alto contenido de arena (tabla 4), a diferencia de la composición textural en pasto cuya concentración de arcilla es mayor con presencia de suelos impermeables. Ante lo cual González (2011), describe que la zona de bosque provista de suelos Franco a Franco arenoso presentan una posibilidad de infiltración alta a muy alta en función a su concentración de arenas contrario a la composición textural en pasto de tipo Franca, Franco arcillo arenosa y Franco arcillosa, cuya posibilidad de infiltración es alta, media y baja, resultados que concuerda con las variaciones de los valores de la velocidad de infiltración (tabla 2) y su estrecha relación entre el tipo de textura encontrado y las velocidades de infiltración.

Tabla 4. Resultados de la composición textural de suelos en bosques y pasto.

Cobertura	Distancia al borde del río (m)	% de Arena	% de Limo	% de Arcilla	Textura
Bosque	20	65,3	27,0	7,7	Franco arenosa
	50	55,5	28,0	16,5	Franco arenosa
	100	43,0	33,5	23,5	Franca
Pasto	20	51,5	27,0	21,5	Franco arcillo arenosa
	50	37,5	30,5	32,0	Franco arcillosa
	100	48,0	29,5	22,5	Franca

[Fuente: Elaboración propia]

Los resultados de la Densidad longitudinal de raíces DLR (tabla 5), muestran una densidad longitudinal promedio de 0,22 m para bosque y 0,33 m para pasto, mostrando un valor superior en pasto contrario a los resultados obtenidos para la velocidad de infiltración, densidad aparente y textura a los cuales se les atribuye una estrecha relación, ante lo cual se concuerda con los factores que pudieron incidir en estos valores según el estudio de Rodríguez et al. (1994), cuyos autores destacan mayor o menor densidad de raíces en dependencia del proceso de distribución del sistema radical, mostrando diferencias altamente significativas en diferentes profundidades, distancia y localizaciones, dependiendo del alejamiento del eje del tallo y profundidad, lo cual justificaría tales resultados según las muestras de suelo tomadas con el cilindro plástico para la obtención de raíces. De acuerdo a la distancia al borde del río a los 50 m la densidad longitudinal de raíces muestra la mayor desviación estándar de 0,22 m, lo cual atribuye a bosque no intervenido, presentando mayor dispersión frente a su valor promedio (tabla 6).

En el caso de la longitud de raíces, la tabla 5 muestra que la cobertura de pasto presenta el valor más alto con respecto a la media, cuyo valor es 2,31 m, valor que se asocia al número de ejes de raíz, altura promedio, DAP promedio y cobertura de dosel, relación que coincide con lo manifestado por Delgado et al. (2008) quien indica que el desarrollo, profundidad, longitud, y la densidad de las raíces de un árbol, se encuentran relacionados a la textura, resistencia a la penetración y compactación del suelo, así como también a la disponibilidad de humedad y nutrientes presentes. De manera general se estima también la distancia al borde del río, en la que se evidencia que la mayor dispersión se ubica a los 100 m del borde del río con un valor de 1,74 m (tabla 6).

De acuerdo a la tabla 5 los resultados de la cobertura vegetal a nivel de dosel y sotobosque, muestran que los pastos presentan los mayores valores promedio a nivel de cobertura de dosel y sotobosque con el 0,41 % y 0,64 % respectivamente, resultados que conforme lo expuesto por Donis (2015) mientras mayor sea el porcentaje de cobertura, mayor es la posibilidad de infiltración de agua en el suelo. Ante lo cual cabe considerar que según el valor obtenido en pasto a nivel de sotobosque

su valor atribuye en su mayoría a que la cobertura se encuentra cubierto por gramalote (*Axonopus scoparius*), valor que incide al alto porcentaje de cobertura vegetal a nivel del suelo. Sin embargo, bosque presenta la mayor dispersión alrededor de la media, tanto a nivel de dosel y sotobosque con el 0,22 % y 0,29 % (tabla 6).

Finalmente, se describe la distancia al borde del río, donde el mayor valor promedio se ubica a los 100 m con una cobertura de dosel de 0,49 %, mientras que la cobertura de sotobosque concentra el mayor porcentaje a los 20 m con el 0,64 %, porcentajes que evidencian la presencia de plantas pequeñas y árboles jóvenes cubiertos por el dosel a la espera de claros para su crecimiento, proceso que concuerda con lo expuesto por Bastias (2005), que áreas de mayor cobertura a nivel de dosel, no favorece al desarrollo del sotobosque. Si analizamos de desviación estándar tenemos como resultado que a los 50 m del borde del río se encuentra mayor dispersión que tienen los datos respecto de su media aritmética. (tabla 6).

Tabla 5. Medidas resumen en función del tipo de cobertura

Cobertura	Descripción	Densidad longitudinal de raíces (m)	Longitud radial de raíces (m)	% Cobertura dosel	% Cobertura sotobosque
Bosque	Media	0,22	1,47	0,37	0,58
	D.E.	0,09	0,51	0,22	0,29
	Mín.	0,14	0,44	0,10	0,03
	Máx.	0,38	1,90	0,70	0,95
Pasto	Media	0,33	2,31	0,41	0,64
	D.E.	0,17	1,64	0,17	0,07
	Mín.	0,20	0,96	0,22	0,55
	Máx.	0,63	5,33	0,67	0,71
[Fuente: Elaboración propia]					

Tabla 6. Medidas resumen en función de la distancia al borde del río

Distancia	Descripción	Densidad longitudinal de raíces (m)	Longitud radial de raíces (m)	% Cobertura dosel	% Cobertura sotobosque
20 m	Media	0,23	1,33	0,31	0,64
	D.E.	0,09	0,60	0,21	0,08
	Mín.	0,14	0,44	0,10	0,55
	Máx.	0,38	1,89	0,67	0,71
50 m	Media	0,30	1,67	0,38	0,57
	D.E.	0,22	0,86	0,22	0,39
	Mín.	0,16	0,96	0,21	0,03
	Máx.	0,63	2,92	0,70	0,95
100 m	Media	0,30	2,71	0,49	0,60
	D.E.	0,12	1,75	0,11	0,12
	Mín.	0,20	1,74	0,38	0,45
	Máx.	0,47	5,33	0,63	0,71
[Fuente: Elaboración propia]					

En la figura 2, se describe el análisis de correspondencia múltiple, en la que se puede observar que la mayor parte de las parcelas se agrupa en un solo grupo y presentan una alta asociación con poca variabilidad debido a su cercanía, mientras que las parcelas dos y cinco indican que sus características, las muestran diferentes al resto de parcelas.

El análisis de varianza, para la velocidad de infiltración, no mostró diferencias significativas en $p \leq 0,05$ tanto para la cobertura, como la distancia al borde del río.

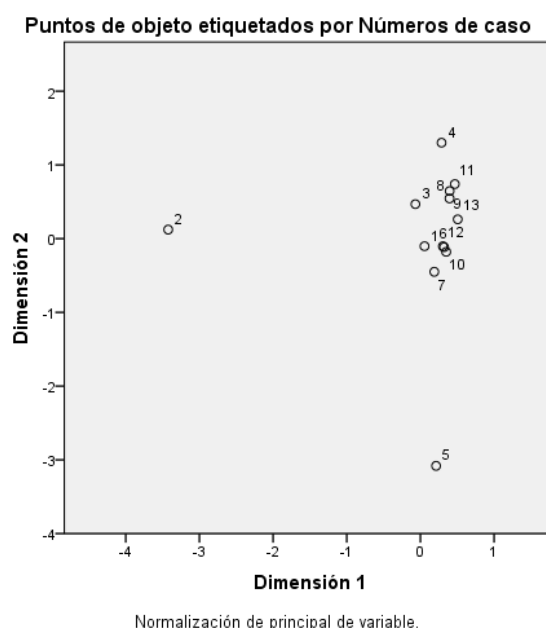


Figura 2. Representación gráfica del análisis de correspondencia múltiple.

La interpretación de los datos se realizó a través del diseño estadístico de coeficiente de correlación lineal de Pearson, con el objetivo de medir el grado de correlación entre las diferentes variables relacionadas linealmente (tabla 7), identificándose que para $p \leq 0,01$, categoría bosque se evidencia una correlación positiva muy fuerte entre las variables: arena- limo y arena-arcilla; para la cobertura de pasto entre la densidad aparente-cobertura de sotobosque; y, para los dos tipos de cobertura entre las variables parcela-distancia.

Mientras que, para la correlación $p \leq 0,05$, se evidencia una correlación positiva considerable entre las variables: distancia-arcilla, parcela-arcilla y arcilla-limo en bosque y una correlación negativa entre las variables: parcela-arena, cobertura de dosel-cobertura de sotobosque, diferente a los resultados de la cobertura pasto donde, únicamente densidad de raíces-arcilla evidencian una correlación negativa muy fuerte.

Para el resto de variables, se identificó una correlación negativa considerable entre distancia-arena en bosque y en pasto arena-arcilla y opuesto una correlación positiva considerable en bosque entre la velocidad de infiltración-densidad aparente y para el tipo de cobertura pasto entre parcela y longitud de raíces.

Tabla 7. Análisis de Correlación R^2 de Pearson.

Cobertura		Dist.	Parcela	Vel. infiltración	Densidad aparente	Densidad raíces	Cobertura dosel	Cobertura sotobosque	Long. raíces	Arena	Limo	Arcilla
Bosque	distancia	1	0,927**	0,509	0,150	0,037	0,570	-0,129	0,567	-0,754	0,608	0,778*
	Vel. infiltración	0,509	0,278	1	0,780	0,495	0,532	-0,242	0,263	0,103	-0,121	-0,086
	Densidad aparente	0,150	-0,116	0,780	1	0,551	0,040	0,285	0,223	0,383	-0,564	-0,260
	Densidad raíces	0,037	-0,236	0,495	0,551	1	0,188	0,008	0,446	0,031	0,050	-0,071
	Cobertura dosel	0,570	0,633	0,532	0,040	0,188	1	-0,828*	0,594	-0,340	0,341	0,315
	Cobertura sotobosque	-0,129	-0,295	-0,242	0,285	0,008	-0,828*	1	-0,243	0,034	-0,209	0,062
	Long. raíces	0,567	0,570	0,263	0,223	0,446	0,594	-0,243	1	-0,582	0,442	0,615
	Arena	-0,754	-0,782*	0,103	0,383	0,031	-0,340	0,034	-0,582	1	-0,912**	-0,976**
	Limo	0,608	0,625	-0,121	-0,564	0,050	0,341	-0,209	0,442	-0,912**	1	0,801*
	Arcilla	0,778*	0,810*	-0,086	-0,260	-0,071	0,315	0,062	0,615	-0,976**	0,801*	1
Pasto	distancia	1	0,946**	0,544	-0,256	0,246	0,124	-0,082	0,585	-0,091	0,182	-0,035
	Vel. infiltración	0,544	0,320	1	-0,485	0,314	-0,115	-0,620	-0,305	0,033	0,087	-0,082
	Densidad aparente	-0,256	-0,321	-0,485	1	-0,531	-0,592	0,918**	0,036	0,015	0,559	-0,358
	Densidad raíces	0,246	0,355	0,314	-0,531	1	-0,060	-0,337	0,065	-0,706	-0,514	0,914*
	Cobertura dosel	0,124	0,262	-0,115	-0,592	-0,060	1	-0,431	0,454	0,542	-0,631	-0,069
	Cobertura sotobosque	-0,082	-0,043	-0,620	0,918**	-0,337	-0,431	1	0,385	-0,137	0,394	-0,128
	Long. raíces	0,585	0,750	-0,305	0,036	0,065	0,454	0,385	1	0,011	-0,172	0,096
	Arena	-0,091	-0,211	0,033	0,015	-0,706	0,542	-0,137	0,011	1	-0,093	-0,789
	Limo	0,182	0,021	0,087	0,559	-0,514	-0,631	0,394	-0,172	-0,093	1	-0,539
	Arcilla	-0,035	0,166	-0,082	-0,358	0,914*	-0,069	-0,128	0,096	-0,789	-0,539	1

** . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas).

* . La correlación es significativa en el nivel 0,05 (2 colas).

ESPECIES ARBÓREAS EXISTENTES

En las parcelas de 20 m x 20 m se realizó un inventario de especies arbóreas con DAP (diámetro a la altura del pecho) mayor o igual a 10 cm, procediendo a estimar su altura total y número de individuos presentes, con el apoyo de un experto en botánica (tabla 8). Tras lo cual se identificaron las especies representativas en bosque: *Lacistema aggregatum* (P.J. Bergius) Rusby (16), *Wettinia maynensis* Spruce (15), *Inga multinervis* T.D. Penn. (9) y *Hieronyma asperifolia* Pax & K. Hoffm (9), cuya distribución es baja. Las especies más representativas en áreas de pasto son: *Piptocoma discolor* (Kunth) Pruski (16), *Miconia splendens* (Sw.) Griseb. (10), *Hieronyma asperifolia* Pax & K. Hoffm. (5) y *Lacistema aggregatum* (P.J. Bergius) Rusby (5), especies pioneras de madera blanda, fácil propagación y rápido crecimiento, las cuales habitan naturalmente en los sistemas de rotación de cultivos. En la tabla 8 se describen las alturas de los árboles por estrato y porcentaje de representatividad.

Tabla 8. Distribución por grupos de DAP y tipo de cobertura.

Grupo	(DAP)		bosque		Pasto		Promedio global	%
			N° de Individuos	%	N° de Individuos	%		
	desde	hasta						
GRUPO 1	10 cm	20 cm	88	59%	42	64%	130	61%
GRUPO 2	20.1 cm	30 cm	38	26%	12	18%	50	23%
GRUPO 3	30.1 cm	40 cm	12	8%	7	11%	19	9%
GRUPO 4	40.1 cm	50 cm	8	5%	3	5%	11	5%
GRUPO 5	> 50 cm		2	1%	2	3%	4	2%
TOTALES			148		66		214	1
[Fuente: Elaboración propia]								

Las familias arbóreas más representativas dominantes del bosque son: Leguminosae, Arecaceae, Lacistemataceae, Melastomataceae y Urticaceae cuya densidad es alta, dominado por árboles jóvenes. En pasto las familias más representativas son: Melastomataceae y Compositae, con una densidad media y con mayor número de árboles jóvenes, que al igual que en el tipo de cobertura bosque la densidad de árboles grandes y frondosos es baja. Coincidiendo así con lo descrito por Luzuriaga (2014), que el bosque estudiado en la estación Biológica Pindo Mirador sufrió una fragmentación alrededor de la laguna hace muchos años, lo cual refleja una reducción de la composición florística de árboles grandes.

MEDICIÓN DE CAUDALES DE LA MICROCUENCA ALTA DEL RÍO PINDO

Para medir el caudal del río Pindo se utilizó la ecuación de Manning (ecuación 9), con los datos tomados durante los meses de agosto 2017 a julio 2018 en los sectores: cuenca alta, afluente y puente metálico. A través de los cuales se puede observar que los caudales más elevados se presentan en el puente metálico ubicado aguas abajo del área de estudio, misma que se atribuye a la suma de corrientes que aumentan su caudal y variabilidad, diferenciándose de los demás caudales ubicados en el área de estudio aguas arriba, como se puede observar en la figura 3.

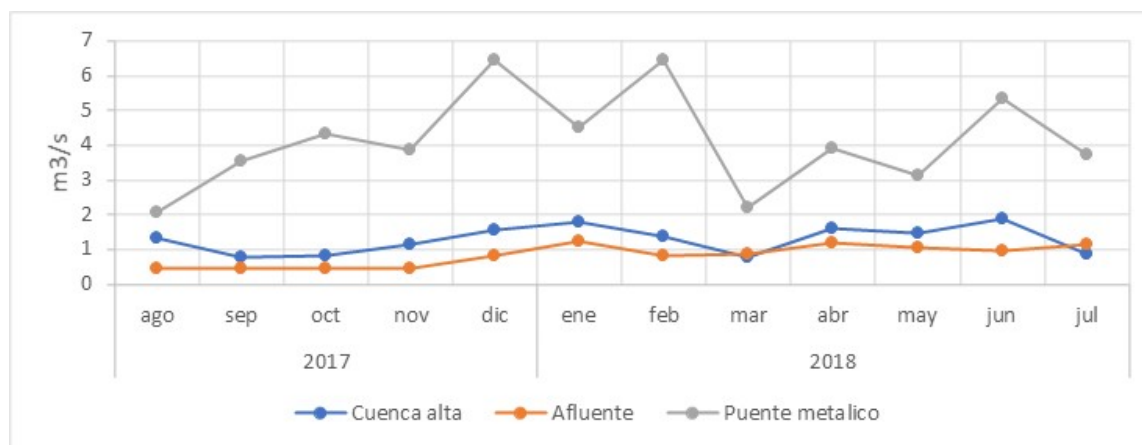


Figura 3. Caudales de la microcuenca del río Pindo sectores cuenca alta, afluente y puente metálico

04 CONCLUSIONES

El uso del suelo bosque presentó una mayor infiltración promedio en discordancia con el pasto, sin embargo, estos valores no fueron significativos. Los valores promedio de la densidad aparente en pasto parcialmente compactado por el pisoteo del ganado y la rotación de cultivos, reportaron la

mayor densidad aparente contrario del bosque, que posee una menor densidad aparente debido a su alta porosidad. De acuerdo a la composición textural del suelo el bosque, presenta alto contenido de arena provista de suelos Franco Arenoso, Franco, cuya posibilidad de infiltración es alta a muy alta, a la inversa del pasto, que muestra mayor contenido de arcilla con suelos de tipo Franco, Franco Arcilloso Arenoso y Franco Arcilloso con posibilidad de infiltración alta, media y baja. En cuanto a los valores promedio la densidad longitudinal de raíces en bosque y pasto, no presentan diferencias significativas. En cuanto al valor promedio según el tipo de cobertura a nivel de dosel y sotobosque, pasto registra el mayor porcentaje. De acuerdo al análisis estadístico, la velocidad de infiltración cm/seg 0.5, densidad aparente (gr/cm^3) y longitud radial de raíces (m) a los 100 m del borde del río cuantifica la mayor dispersión respecto a su valor promedio, en contraste con la densidad longitudinal de raíces (m), % cobertura dosel y % cobertura sotobosque que registra a los 50 m.

05 REFERENCIAS

- Abril R., Yanez Y., Villarroel C., Idrovo I., Caicedo E., Vargas M., Tapia A. and Valle M.** (2019). "Influence of land use and geomorphology on the flow of the Pindo river", *Journal of Environmental Hydrology*, 27 (9): 1-14, ISSN 1058-3912, Universidad Estatal Amazónica, Departamento de Ciencias de la Vida, Ecuador.
- Bastias M.** (2005). "Composición de especies y cobertura del sotobosque en bosques vírgenes de Lengua (*Nothofagus pumilio* (Poepp. et Endl.) Krasser) En Monte Alto, XII Región", Tesis de pregrado, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Delgado R., Castro L., Cabrera E., Mujica M., Caniche S., Navarro L. y Noguera I.** (2008). "Relación entre propiedades físicas del suelo y algunas características del sistema radical del maíz, cultivado en un suelo fluventic haplustoll de textura franco-arenosa de Maracay", *Agronomía Tropical*, 58 (3): 245-255, ISSN 0002-192X, Venezuela.
- Donis L.** (2015). "Identificación de zonas de recarga hídrica en la microcuenca del río Negro", Tesis de pregrado, Facultad de Ciencias Ambientales y Agrícolas, Universidad Rafael Landívar, Guatemala.
- FAO.** (2013). "Forests and water", International momentum and action, ISBN 978-92-5-107418-3, Rome.
- González A., Álvarez P., González M. y Aguirre Z.** (2016). "Influencia de la cobertura vegetal en los coeficientes de escorrentía de la cuenca del río Catamayo", *Revista del Centro de Estudios y Desarrollo de la Amazonía*, 6 (1): 50-59, ISSN 1390-590, Universidad Nacional de Loja, Ecuador.
- González W.** (2011). "Manejo y protección de zonas de recarga hídrica y fuentes de agua para consumo humano en la subcuenca del río Zaratí, Panamá", Tesis de Magister Scientiae, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Escuela de posgrado del CATIEE (Turrialba), Costa Rica.
- Luzuriaga C.** (2014). "Inventario florístico del bosque que rodea a la laguna en la estación Biológica Pindo Mirador Pastaza-Ecuador", *Revista de Investigación Científica*, 5 (6): 15 -25, ISSN 2600-5557, Universidad Tecnológica Equinoccial, Ecuador.

Rodríguez L., Camacaro M. y Pire R. (1994). "Densidad Longitudinal de Raíces en Naranja Valencia (*Citrus sinensis* L.) sobre el patrón de Limón Volkameriana (*Citrus volkameriana* Pasq.) en la zona de Sicariagua, Estado Lara", *Bioagro* 6 (2): 35-39, Venezuela.

Sierra R. (1999). "Propuesta preliminar de un sistema de clasificación de vegetación para el Ecuador continental", Editorial Rimana, ISBN 9978409432 9789978409435, Quito, Ecuador.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Andrea Carolina Beltrán <https://orcid.org/0000-0002-3804-061X>

Trabajó en el procesamiento de los datos haciendo contribuciones en su análisis e interpretación.
Participó en el análisis de resultados y en la redacción final.

Ricardo Abril Saltos <https://orcid.org/0000-0003-1544-4360>

Realizó contribuciones en la interpretación de los datos. Participó en el diseño de la investigación, análisis de los resultados y en la revisión.

Edwin Ricardo Paredes <https://orcid.org/0000-0002-9754-2708>

Realizó contribuciones en su análisis e interpretación y en la búsqueda de información y revisión final.

Validación del modelo en CFD de una nave ante cargas de viento con análisis estacionario

Rigoberto Morales Hernández

E-MAIL: rigobermorher@civil.cujae.edu.cu

Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE). Departamento de Estructuras, Facultad de Ingeniería Civil.

Manuel Alejandro Amador Núñez

E-MAIL: malejandroan@civil.cujae.edu.cu

Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE). Departamento de Estructuras, Facultad de Ingeniería Civil.

Ingrid Fernández Lorenzo

E-MAIL: ngridfl@civil.cujae.edu.cu

Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE). Departamento de Estructuras, Facultad de Ingeniería Civil.

Vivian Beatriz Elena Parnás

E-MAIL: vivian@civil.cujae.edu.cu

Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE). Departamento de Estructuras, Facultad de Ingeniería Civil.

RESUMEN

Este trabajo se realizó con el objetivo de validar el modelo de dinámica computacional de fluidos (CFD, por sus siglas en inglés) de una nave, utilizando para ello datos experimentales extraídos de un ensayo de túnel de viento realizado por autores internacionales. La simulación se efectuó con el software ANSYS Fluent, empleando el modelo de turbulencia k-ε realizable, mediante un análisis estacionario. Los resultados mostraron un buen ajuste, sobre todo en la zona de la cubierta y paredes laterales, donde se encontraron diferencias entre los coeficientes de presiones menores al 10%. Los datos experimentales y los simulados fueron comparados con lo propuesto por el Eurocódigo, obteniéndose un comportamiento similar para todas las zonas de la cubierta excepto las esquinas a barlovento, donde la norma es más conservadora.

Palabras Claves: análisis estacionario, coeficientes de presión, dinámica computacional de fluidos (CFD), estructuras bajas, validación.

Validation of the CFD model of a low-rise building under wind loads with steady analysis

ABSTRACT

This work was carried out with the objective of validate the computational fluid dynamics (CFD) model of a low-rise building, using for that the experimental data extracted from the boundary layer wind tunnel test executed by international authors. For the simulation was used the ANSYS Fluent software, employing the realizable k-ε turbulence model and a steady analysis. The results show a good fit, especially in the areas of the roof and side walls, where the existing differences between pressure coefficients are less than 10%. The experimental and simulated data were compared with the proposed by the Eurocode, obtaining a behavior similar for all the roof zones except the windward corners, where the code is conservative.

KEYWORDS: steady analysis, pressure coefficients, computational fluid dynamics (CFD), low-rise buildings, validation.

01 INTRODUCCIÓN

Las estructuras bajas son de las tipologías constructivas más comunes y en las que se registra un mayor índice de fallos ante las acciones de vientos extremos. Esta razón motiva la profundización en el estudio de las cargas de viento para el correcto diseño de estas estructuras, fundamentalmente el análisis de los coeficientes aerodinámicos debido a las discrepancias encontradas en el abordaje de estos parámetros en las diferentes normas (Amador et al. 2021). Para la determinación de los coeficientes normados se utilizan generalmente estudios en túneles de viento, aunque con el auge de la computación ha ganado preponderancia la utilización de la dinámica computacional de fluidos (CFD, por sus siglas en inglés)

CFD es una herramienta de gran utilidad para el desarrollo de la ingeniería de viento. Entre las ventajas de su utilización se encuentran la capacidad de producir gran cantidad y variedad de datos del comportamiento del flujo de aire, la facilidad de realizar simulaciones en geometrías de gran complejidad, así como su menor costo económico con respecto a otras técnicas de análisis del viento como son los túneles de viento y las mediciones en estructuras reales.

A pesar de las múltiples ventajas, también existen desventajas como son el estar limitada por la capacidad computacional y la dificultad de caracterizar matemáticamente los procesos turbulentos que ocurren en la interacción del viento con las estructuras, especialmente en flujos con altos niveles de intensidad de turbulencia. Esto se debe a que los análisis en CFD se basan en la resolución numérica de las ecuaciones de Navier-Stokes, las cuales son ecuaciones de derivadas parciales tridimensionales, no lineales y dependientes del tiempo. Estas ecuaciones no describen explícitamente la turbulencia del flujo, por lo que se han creado diferentes enfoques para resolver este problema. Entre los más comunes se encuentran la simulación numérica directa (DNS), la simulación de grandes remolinos (LES) y las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds (RANS) (todas las siglas en inglés).

Aunque teóricamente con la Simulación Numérica Directa se obtienen los resultados más cercanos a la realidad, en la práctica solo se pueden resolver mediante este método modelos sumamente simplificados y con bajos números de Reynolds. Esto se debe a la gran potencia de cálculo necesaria para simular el comportamiento del flujo utilizando este enfoque, por lo que no es comúnmente empleado.

Mediante la simulación de grandes remolinos los vórtices de mayor tamaño son calculados directamente mientras que a los pequeños se le aplican simplificaciones. Esto provoca que el método dependa en gran medida del tamaño del mallado, requiriendo una malla más pequeña y, en consecuencia, más tiempo de cálculo que los modelos RANS (Kim et al. 2019). No obstante, los modelos LES permiten simular flujos inestables adecuadamente por lo que son más recomendables cuando se realizan análisis transitorios.

Según Irtaza et al. (2013) con el modelo $k-\epsilon$ estándar se pueden llegar a sobrevalorar los coeficientes de presiones hasta en un 25 %, especialmente en la zona de la pared a barlovento, mientras que con otros modelos RANS como $k-\epsilon$ realizable y $k-\epsilon$ RNG la diferencia con resultados experimentales es de entre el 10 % y el 15 %. La principal ventaja de este tipo de modelos radica en su menor demanda de capacidad de cómputo, siendo cerca del 5 % de lo requerido por un modelo LES, así como la posibilidad de realizar tanto análisis estacionarios como transitorios ya que los modelos LES al estar basados en el cálculo del promedio espacial de las ecuaciones del flujo son dependientes del tiempo, por lo que no proporcionan soluciones adecuadas mediante análisis estacionarios.

Si bien se pueden lograr resultados muy precisos utilizando la simulación numérica, para aceptar como correctos los resultados de una simulación de CFD es necesario realizar la validación del modelo, utilizando para ello datos experimentales. Generalmente para la obtención de estos datos se utilizan ensayos de túnel de viento. Diversos autores (Amaya-Gallardo et al. 2016, Králik et al. 2017) han utilizado esta técnica para calibrar modelos de CFD, obteniendo variados resultados dependiendo principalmente del modelo de descripción de turbulencia utilizado. Králik et al (2017) utilizando la simulación de remolinos con desprendimiento retardado (DDES, por sus siglas en inglés) alcanzaron una diferencia con respecto al túnel de viento del 20,1 %, mientras que con la simulación de escala adaptable (SAS, por sus siglas en inglés) la disparidad fue del 24,8 %. En este caso el análisis fue de tipo transitorio. Por su parte, Amaya-Gallardo et al. (2016) logran obtener coeficientes de presión de similar magnitud al modelo en escala real de una estructura cúbica, utilizando el modelo de turbulencia k- ϵ standard mediante un análisis estacionario.

Fernández-Cabán y Masters (2018) realizaron una serie de estudios sobre una estructura baja utilizando un túnel de viento de capa límite. Para ello ensayaron diferentes combinaciones de intensidad de turbulencia, rugosidad del terreno y ángulo de ataque del viento sobre un modelo a escala de una nave. El objetivo de este trabajo es validar el modelo numérico de una estructura baja tipo nave mediante análisis estacionario, empleando para ello los datos experimentales obtenidos por Fernández-Cabán y Masters (2018) en su estudio. Los coeficientes de presiones adquiridos por ambos métodos (túnel de viento, CFD) y ponderados en área fueron comparados con los propuestos por el Eurocódigo (EN1991-1-4 2004), ya que esta es una de las normas que mejor refleja la formación de la burbuja de separación y otros fenómenos presentes en este tipo de estructuras (Amador et al. 2021).

02 CARACTERÍSTICAS DEL MODELO COMPUTACIONAL

El modelo computacional desarrollado recrea el utilizado por Fernández-Cabán y Masters (2018) en su artículo. Estos autores ensayaron un modelo de una nave en un túnel de viento de capa límite, utilizando elementos de rugosidad variables para obtener diferentes intensidades de turbulencia. Para simular las características de este experimento mediante el software ANSYS (2018), se tuvieron en cuenta propiedades del modelo computacional como el dominio, mallado y definición matemática del viento, las cuales se describen a continuación.

De los diferentes casos que consideran estos autores, se seleccionó el que presenta una intensidad de turbulencia del 21,1% y un ángulo de incidencia del viento paralelo a la cresta de la edificación. Se escogió este caso para realizar el estudio de validación ya que estos niveles de intensidad de turbulencia son semejantes a los que se pretenden estudiar en simulaciones posteriores, por lo que es necesario comprobar que con un análisis estacionario y las características del modelo utilizadas se puede replicar correctamente un flujo con intensidades de turbulencia similares.

DOMINIO Y MALLADO

La estructura analizada es una nave con cubierta a dos aguas y un ángulo de inclinación de la misma menor a 5°, por lo que se considera un techo plano. Para realizar ensayos de túnel de viento es necesario desarrollar modelos a pequeñas escalas debido a la imposibilidad económica y técnica de tener un ambiente controlado de dimensiones suficientemente grandes para estudiar edificios. El uso de CFD no tiene esta dificultad, por lo que la simulación de este modelo se realizó a escala real, con dimensiones de 9,2 m de ancho, 14 m de largo y 4 m de altura de muros.

El dominio computacional en el que se encuentra inmerso el modelo se tomó como se muestra en la figura 1, siendo la altura de la estructura (H) igual a 4 m. Con estas dimensiones del dominio se obtuvo una relación de bloqueo del 1,4 %. Esto asegura que se cumpla con lo recomendado (Holmes 2007) de un mínimo de un 5 % para que no existan interacciones entre las paredes del dominio y la estructura que puedan causar variaciones indeseadas en el comportamiento del flujo.

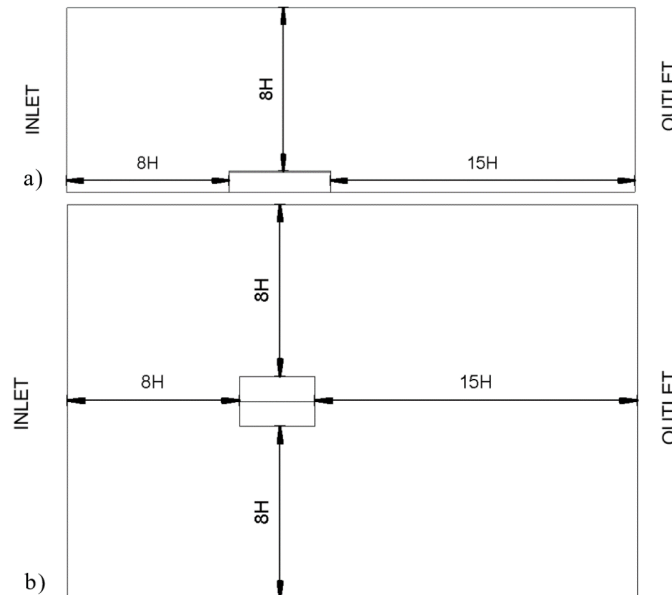


Figura 1. Dimensiones del dominio computacional en elevación (a) y en planta (b)

Se utilizó un mallado estructurado, formado por celdas hexaédricas y compuesto por múltiples capas, donde el tamaño máximo de los elementos disminuye a medida que se encuentran más cercanos a la estructura. Para la capa más externa, donde se encuentra la zona del dominio más alejada de la estructura, el tamaño máximo de las celdas fue de 2,1 m; mientras que en la capa directamente en contacto con la estructura, el tamaño de los elementos fue de 0,2 m. El número total de elementos fue de 3,3 millones aproximadamente.

CARACTERIZACIÓN MATEMÁTICA DEL VIENTO

Para modelar el flujo del viento en el ANSYS Fluent se utilizan las formulaciones especificadas por Fernández-Cabán y Masters (2018), con lo que se garantiza una mayor similitud entre el ensayo de túnel de viento y la simulación. Las características del viento replicadas en el modelo numérico fueron el perfil vertical de velocidad (1) y la intensidad de la turbulencia, esta última a partir de la energía cinética turbulenta (2). Los coeficientes de presión (5) también fueron calculados de manera semejante a dicho artículo.

El perfil de velocidad del viento toma una forma logarítmica, descrita por la ecuación (1), donde U es la velocidad del viento, u_* es la velocidad de fricción, k es la constante de Von Kármán, z es la altura de cálculo, z_D es la altura del plano de cero desplazamientos y z_0 la longitud de rugosidad.

$$U = \frac{u_*}{k} \ln\left(\frac{z - z_D}{z_0}\right) \quad (1)$$

k se asumió como 0,4; z_0 tiene un valor de 0,114 m según los autores del ensayo; z_D (0,416 m) fue calculada como un por ciento de la altura de los elementos de rugosidad utilizados en el túnel de viento y u_* fue despejada de la ecuación del perfil, dando como resultado 2,7 m/s.

La figura 2 muestra los perfiles de viento logarítmico (1) y experimental extraído del estudio de Fernández-Cabán y Masters. La velocidad del viento fue normalizada a partir de la velocidad de referencia ($U_{ref} = 38,26$ m/s) tomada a una altura de 33,4 m. La elevación fue normalizada según la altura del modelo ($H = 4$ m). Debido a que se observa cierta discrepancia entre estos perfiles, se decidió ajustar los datos empíricos mediante una curva que diera una descripción más acertada del comportamiento de la velocidad del viento. El perfil introducido en la simulación fue definido según esta curva de ajuste al inicio del dominio computacional, en la entrada del flujo.

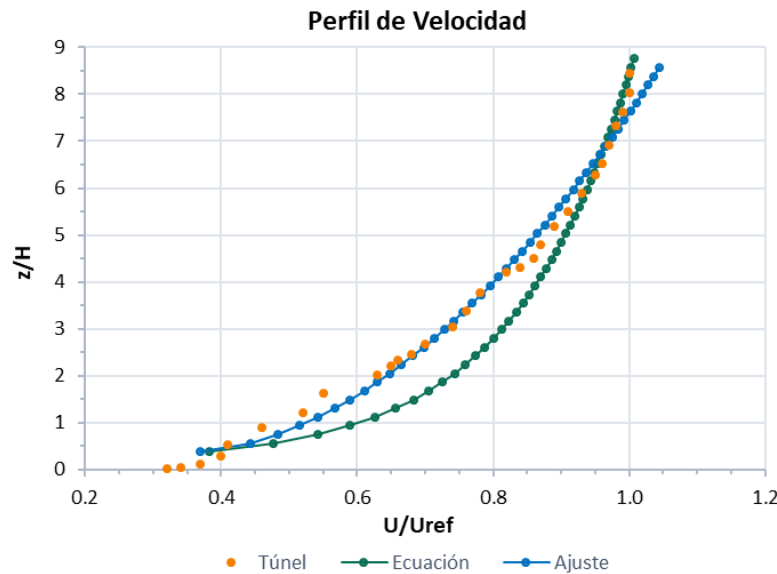


Figura 2. Perfil de velocidades del viento

La energía cinética turbulenta (k) fue definida según (2) y la tasa de disipación turbulenta (ε) según (3). Estas ecuaciones son recomendadas (Blocken et al. 2007) cuando se utilizan modelos de turbulencia RANS. C_μ es una constante empírica con valor 0,09. La intensidad de turbulencia se calculó en la entrada del modelo utilizando (4).

$$k(z) = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad (2)$$

$$\varepsilon(z) = \frac{u_*^3}{k \cdot z} \quad (3)$$

$$I_{(z)} = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}k}}{U_{(z)}} \cdot 100 \quad (4)$$

El perfil de turbulencia obtenido se muestra en la figura 3, junto a los datos del ensayo en túnel de viento. Dada la poca correspondencia entre ambos perfiles de turbulencia, se optó por seguir un procedimiento semejante al de la velocidad del viento, utilizando la ecuación de la curva de ajuste para introducir la turbulencia en el modelo numérico

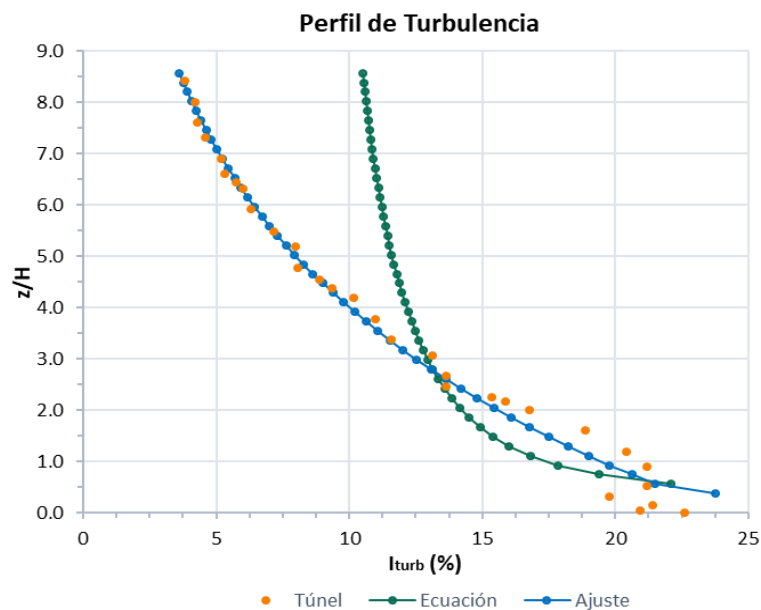


Figura 3. Perfil de intensidad de turbulencia

El experimento en el túnel de viento se realizó para un tiempo de 300 s y una frecuencia de muestreo de 625 Hz. Debido a que realizar una simulación con estas características demanda la utilización de grandes recursos computacionales, los cuales no se encuentran en las computadoras personales si no en clústers, se decidió utilizar un flujo estacionario. Aunque los resultados obtenidos con este tipo de análisis son simplificados, pueden llegar a alcanzar una precisión lo suficientemente cercana a la realidad con un costo computacional mucho menor, siendo su uso en este tipo de problemas avalado por diversos estudios (Amaya-Gallardo et al. 2016).

La comparación con los resultados del artículo se realizó mediante los coeficientes de presiones C_p . Estos se calcularon por la ecuación (5) donde P es la presión del viento sobre la estructura, P_0 es la presión de referencia, ρ es la densidad del aire y U_H es la velocidad media del flujo a la altura de la edificación.

$$C_p = \frac{P - P_0}{0,5\rho U_H^2} \quad (5)$$

El valor de P_0 (11,30 Pa) se tomó directamente del software para una altura de referencia de 33,4 m. Esta es la altura correspondiente a escala real de la utilizada en el túnel de viento, la cual fue de 1670 mm al estar en ese caso el modelo a escala 1:20. La densidad del aire, se asumió como 1,205 kg/m³ para una temperatura de 25°C. Para U_H se obtuvo un valor de 20,18 m/s, tomado a la entrada del dominio.

El modelo utilizado para caracterizar la turbulencia fue el k-ε realizable. Fue escogido este modelo ya que según Abohela et al. (2012) es preferible cuando se analizan estructuras aisladas, además de que es utilizado por otros autores (Singh and Roy 2019) en estudios similares. En la figura 4 se muestran las líneas de flujo, donde se puede observar que el viento en su interacción con la estructura se comporta según lo previsto por los modelos teóricos, destacándose la formación de la burbuja de separación en la zona de la cubierta más cercana a barlovento, así como la presencia de vórtices en las paredes de barlovento y sotavento.

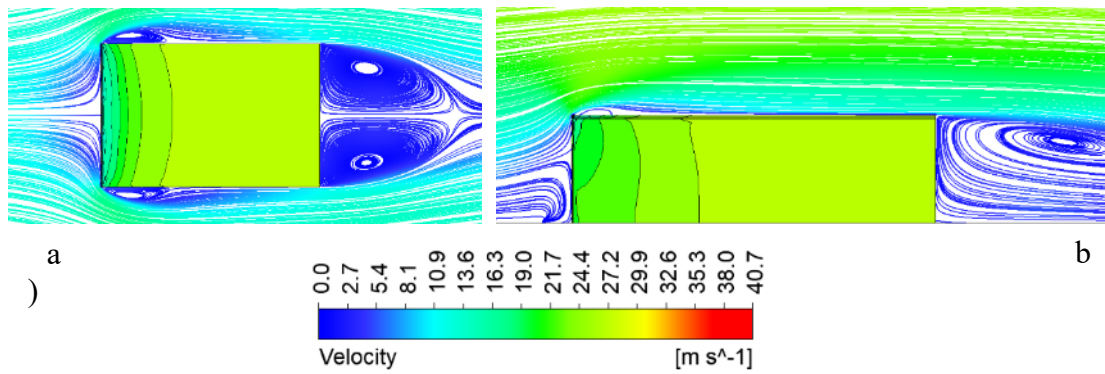


Figura 4. Líneas de flujo alrededor de la estructura en planta (a) y elevación (b)

La resolución numérica se llevó a cabo realizando un análisis estacionario, implícito, de doble precisión, ecuaciones de momento, de k y de ϵ de segundo orden, interpolación de la presión estándar y algoritmo de emparejamiento de presión-velocidad mediante el método semi-implícito para ecuaciones de presión vinculadas (SIMPLE, por sus siglas en inglés).

En aras de comparar los resultados de ambos estudios (CFD y túnel de viento) con los coeficientes propuestos por el Eurocódigo (EN1991-1-4 2004), se realizó una ponderación en área según la ecuación (6), donde C_f es el coeficiente ponderado de cada área, C_p el coeficiente de presión medio y A_i es el área tributaria de cada valor de presión.

$$C_f = \frac{\sum_i^n C_p * A_i}{\sum_i^n A_i} \quad (6)$$

Este procedimiento se realizó tanto para las presiones simuladas como las experimentales, utilizando en ambos casos las áreas tributarias que propone el Eurocódigo. Las dimensiones y distribución de estas superficies se muestran en la figura 5 y están en dependencia del valor e , el cual se determina como el menor valor entre la dimensión transversal al viento (b) y dos veces la altura total de la edificación ($2h$).

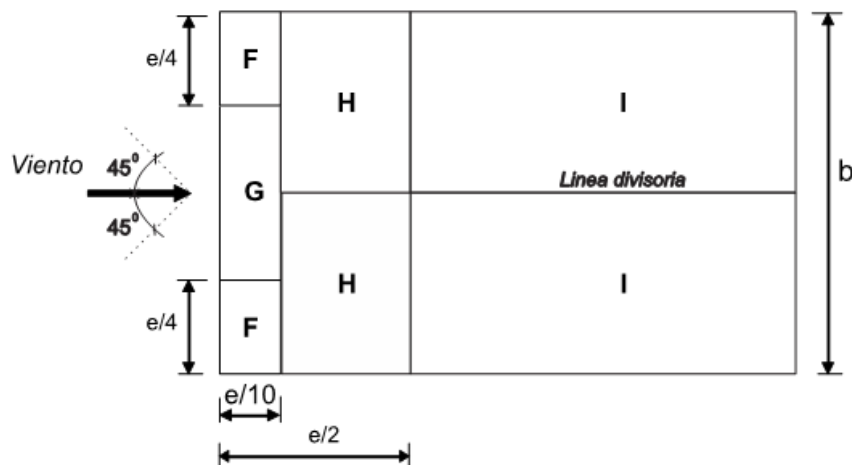


Figura 5. Distribución de área de ponderación según el Eurocódigo

03 RESULTADOS

La figura 6a muestra los coeficientes de presiones obtenidos mediante la simulación en CFD, mientras que en la 6b se observan los resultados alcanzados por Fernández-Cabán y Masters (2018) en el túnel de viento. En ambos casos se advierte un comportamiento similar, existiendo presiones en la pared a barlovento con los valores máximos en el centro de la pared. En el borde de la cubierta más cercano a barlovento se encuentra una pequeña franja donde se ubican las mayores succiones, las cuales van disminuyendo gradualmente hasta cerca de la mitad de la longitud de la nave. A partir de este punto el valor de los coeficientes de presión se mantiene constante hasta el final de la cubierta. La pared a sotavento presenta succiones en toda su superficie. La distribución de las presiones es simétrica con respecto al eje central de la nave, siendo este el comportamiento esperado al no existir ningún obstáculo en el terreno que pueda modificar el comportamiento del flujo y al ser la propia geometría de la nave simétrica.

En la cubierta y paredes laterales se advierte gran concordancia entre ambos estudios, siendo la diferencia entre ellos menor que el 10 % en estas superficies. Las desigualdades más notables se encuentran en la pared a barlovento, donde se obtienen valores mayores en la simulación.

Aunque porcentualmente las discordancias pueden llegar a ser significativas (alcanzando un valor del 33,3 % en la pared a sotavento), en términos de valor absoluto la diferencia es mucho menos evidente, siendo para esta misma zona de solo 0,10. Esto se comprueba en la figura 7, donde se comparan los valores de seis curvas de presión tomadas del ensayo físico y las curvas correspondientes con el ensayo numérico. Las curvas 1, 2 y 3 están ubicadas en la pared a barlovento, correspondiéndose con las regiones en rojo, naranja y amarillo y con valores de coeficientes de presión de 0,4, 0,2 y 0 respectivamente. La curva 4 se sitúa cerca del borde a barlovento de la cubierta, en color azul y valor de -1 y la 5 hacia el centro de la cubierta, en color verde con valor de -0,2. La curva 6 se localiza cerca del centro de la pared a sotavento y se corresponde con un coeficiente de -0,23. Las curvas obtenidas en la simulación realizada presentan una distribución similar, siendo la principal variación en los valores de los coeficientes.

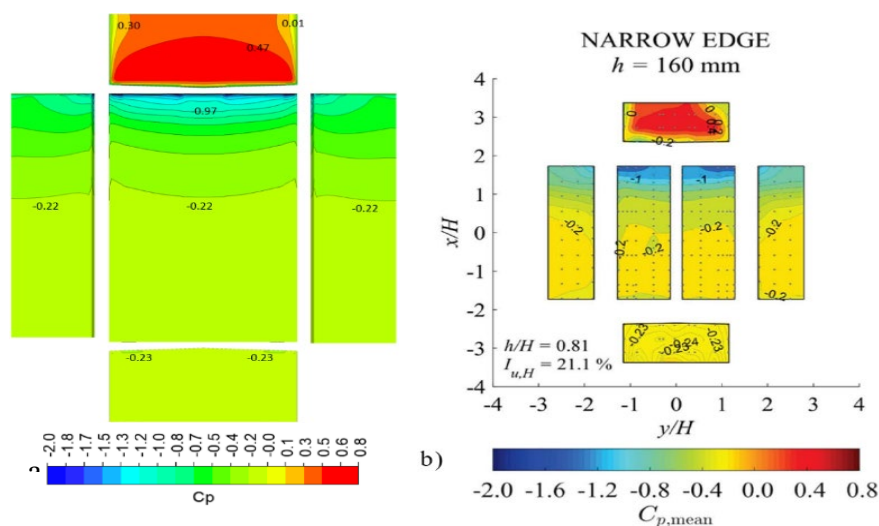


Figura 6. Coeficientes de presión simulado (a) y en túnel de viento (b) (Fernández-Cabán y Masters 2018)

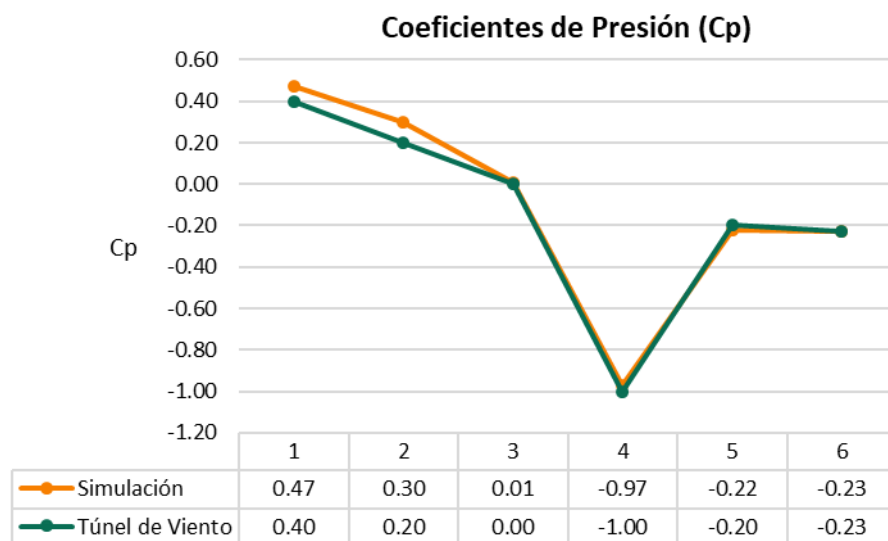


Figura 7. Comparación de coeficientes de presión

Los resultados de la ponderación de los coeficientes de presiones en área se exponen en la figura 8. En esta se puede apreciar que los valores obtenidos mediante CFD, túnel de viento y la normativa muestran un comportamiento similar excepto en la zona F, donde la norma presenta un valor más conservador. Esto podría deberse a que mientras en los ensayos, tanto físicos como numéricos, solamente se analizó el viento incidiendo perpendicularmente a la edificación, en el Eurocódigo se tuvo en cuenta una variación del ángulo de incidencia de $\pm 45^\circ$, lo que afecta especialmente las zonas de las esquinas a barlovento de la cubierta.

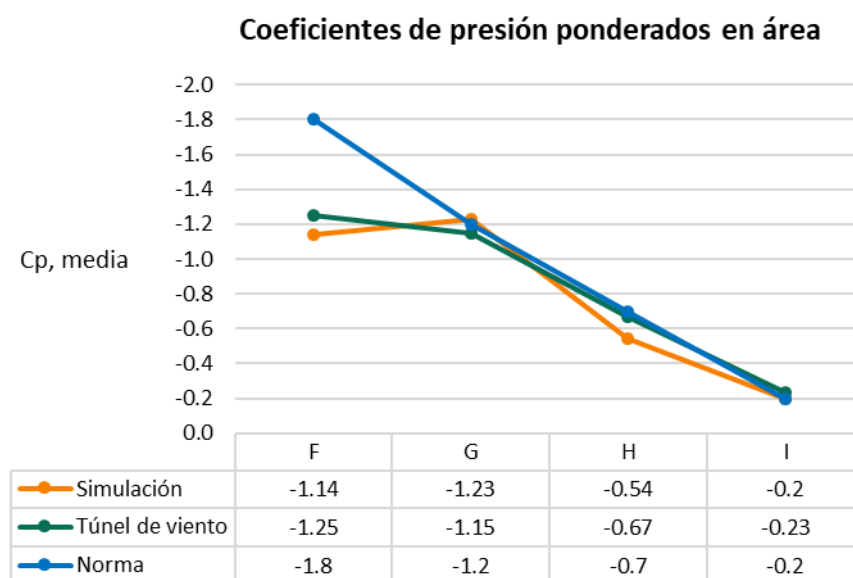


Figura 8. Coeficientes ponderados en área

Los resultados más cercanos a los de la norma fueron los obtenidos en el túnel para las zonas F y H, mientras que en G e I la simulación se aproxima más. Obviando la zona F, las mayores diferencias entre la norma y la simulación fueron de un 22.8 % para la zona H, mientras que entre la norma y el ensayo físico las discrepancias máximas estuvieron dadas para la zona I con un valor del 13.0 %.

04 CONCLUSIONES

A partir de los datos obtenidos por Fernández-Cabán y Masters (2018) se realizó la validación de un modelo computacional, realizando una simulación en CFD con un análisis estacionario del flujo. El modelo de descripción de la turbulencia empleado fue el $k-\epsilon$ realizable. Con la utilización de este tipo de análisis, así como las características antes descritas de mallado, dominio computacional, descripción matemática del viento y modelo de turbulencia, se logró replicar adecuadamente el comportamiento del flujo del aire alrededor de una estructura baja tipo nave.

Con la utilización de las formulaciones propuestas en la bibliografía consultada (Blocken et al. 2007, Fernández-Cabán y Masters 2018) no se logra una correcta descripción de las características del viento, especialmente la turbulencia. Es recomendable la utilización de datos empíricos cuando se disponga de ellos para conformar los perfiles de velocidad del viento e intensidad de turbulencia a introducir en el modelo numérico.

Las mayores discrepancias entre los resultados de la simulación y el túnel de viento se encontraron en las paredes a barlovento y sotavento. En la cubierta y paredes laterales se logró un buen ajuste, siendo la máxima diferencia entre coeficientes de presión de 0,02, lo que representa menos de un 10 %.

Al realizar la ponderación de los coeficientes en área y comparar con lo propuesto por el Eurocódigo se obtuvo que los resultados tanto de la simulación como del túnel de viento y la norma son semejantes en la mayoría de las zonas. Para la región F el Eurocódigo presenta un valor más conservador que el obtenido mediante los otros métodos, lo que se puede deberse principalmente a la dirección de incidencia del viento que se asume en esta normativa.

A pesar de las diferencias percibidas, los resultados de la simulación están en concordancia con los estudios de validación realizados por autores internacionales (Králík et al. 2017, Irtaza et al. 2013), especialmente en la región de la cubierta. Esto evidencia que es posible utilizar un análisis estacionario para simular correctamente el flujo de aire en estructuras bajas ya que se obtienen resultados suficientemente cercanos a los ensayos experimentales sin la necesidad de las grandes demandas computacionales que implica un análisis transitorio.

05 REFERENCIAS

Abohela I., Hamza N. and Dudek S. (2012). "Validating CFD Simulation Results: Wind flow around a surface mounted cube in a turbulent channel flow", Conference, Opportunities, Limits & Needs Towards an environmentally responsible architecture, Lima, Perú.

ANSYS (2018) ANSYS, Inc., Release 19.2, USA.

Amador M. A., Fernández Lorenzo I., López Llanusa A. y Elena Parnás V. B. (2021). "Estudio comparativo de coeficientes de presión normativos y experimentales en cubiertas de naves industriales", Ingeniería y Desarrollo, vol.39, no.2, ISSN 2145-9371, Universidad del Norte, Colombia.

Amaya-Gallardo E., Pozos-Estrada A. y Gómez-Martínez R. (2016) "Simulación experimental y numérica para la obtención de coeficientes de presión sobre un cubo: Estudio comparativo", XX Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, ISSN 20007-2011, Yucatán, México.

- Blocken B., Stathopoulos, T. and J. Carmeliet** (2007). "CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems," *Atmospheric Environment*, vol.41, pp. 238–252, ISSN 1878-2442, Netherlands.
- EN1991-1-4** (2004). "Eurocode 1: Actions on structures — General actions — Part 1-4: Wind actions", European Committee for Standardization (Eurocode), Europe.
- Fernández-Cabán P. L. and Masters F. J.** (2018). "Effects of freestream turbulence on the pressure acting on a low-rise building roof in the separated flow region", *Frontiers in Built Environment*, vol.4, no.17, ISSN 2297-3362, Switzerland.
- Holmes J. D.** (2007). "Wind loading of structures", Taylor & Francis e-Library, ISBN 0-203-34234-8, New York.
- Irtaza H., Beale R. G., Godley M. H. R. and Jameel, A.** (2013). "Comparison of wind pressure measurements on Silsoe experimental building from full-scale observation, wind-tunnel experiments and various CFD techniques", *International Journal of Engineering, Science and Technology*, vol. 5, no.1, pp. 28-41, ISSN 0975-5462, India.
- Kim R-w., Lee I-b., Yeo U-h. and Lee S-y.** (2019). "Estimating the wind pressure coefficient for single-span greenhouses using an large eddy simulation turbulence model", *Biosystems Engineering*, vol.188, pp. 114 – 135, ISSN 1537-5110, United Kingdom.
- Králik J., Konečnáb L. and Lavrinčíkováa D.** (2017). "Experimental Validation of Computer Fluid Dynamics Simulation aimed on Pressure Distribution on Gable Roof of Low-rise Building", *Procedia Engineering*, vol.190, pp. 377 – 384, ISSN 1877-7058, United Kingdom.
- Singh J. and Roy A. K.** (2019). "Effects of roof slope and wind direction on wind pressure distribution on the roof of a square plan pyramidal low-rise building using CFD simulation", *International Journal of Advanced Structural Engineering*, vol.11, no.2 pp. 231 – 254, ISSN 2008-6695, Iran.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Rigoberto Morales Hernández <https://orcid.org/0000-0003-2897-9284>

Trabajó en el procesamiento de los datos, así como en su análisis e interpretación. Se encargó de la redacción del manuscrito y la edición final del mismo.

Manuel Alejandro Amador Núñez <https://orcid.org/0000-0002-0651-5529>

Participó en el diseño de la investigación y análisis de los resultados.

Ingrid Fernández Lorenzo <https://orcid.org/0000-0002-1223-0968>

Participó en el diseño de la investigación y análisis de los resultados. Participó en la revisión del manuscrito.

Vivian Beatriz Elena Parnás <https://orcid.org/0000-0001-7912-7570>

Participó en el análisis de resultados y revisión del manuscrito.

Flujo no lineal permanente en acuíferos confinados y libres en presencia de desarrollo

Juan David Rincón VanegasE-MAIL: juan.rinconva@campusucc.edu.co

Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Cooperativa de Colombia.

RESUMEN

Las actividades de desarrollo son un conjunto de operaciones que se realizan a las estructuras de captación (pozos), las cuales interceptan acuíferos detríticos, con el fin de extraer los granos más finos de la formación acuífera, mejorando considerablemente la permeabilidad en la zona que alcanza el desarrollo. Por lo general, la consideración sobre la zona desarenada en las ecuaciones de flujo ha sido totalmente excluida hasta hace algún tiempo, en el cual, por primera vez, se introdujo en dichas ecuaciones los efectos que tenía desarrollar un pozo en régimen lineal. Ahora bien, como se sabe que el flujo no lineal está presente, comúnmente, en la zona más próxima al pozo, resulta necesario describir con más precisión la componente turbulenta en la zona desarenada, producida por las actividades de desarrollo.

PALABRAS**CLAVES:**

desarrollo de pozos, estructuras de captación, flujo darciano, flujo no lineal, hidráulica de pozos.

Nonlinear permanent flow in confined and free aquifers in the presence of development

ABSTRACT

Development activities are a set of operations that are performed on the intake structures (wells), which intercept detrital aquifers, in order to extract the finer grains of the aquifer formation, considerably improving the permeability in the zone reached by the development. In general, the consideration of the desanded zone in the flow equations has been totally excluded until some time ago, when, for the first time, the effects of developing a well in a linear regime were introduced in these equations. However, since it is known that nonlinear flow is commonly present in the zone closest to the wellbore, it is necessary to describe more precisely the turbulent component in the sandless zone produced by development activities.

KEYWORDS:

well development, catchment structures, darcian flow, nonlinear flow, well hydraulics.

01 INTRODUCCIÓN

Por lo general, las actividades de desarrollo en las estructuras de captación siempre han tenido orientación informativa, tanto técnica como experimental, en relación con los procesos comúnmente utilizados (mecánicos y químicos) en dichas actividades que, en la realidad, resultan bastante abstractos dentro de ese punto de vista (Johnson 1966). No obstante, aunque no se realizó una investigación teórica exhaustiva a los efectos producidos por las actividades de desarrollo, si se contempló que dicha actividad generaba diversos tipos de beneficios para obtener un rendimiento hidráulico eficiente del pozo (Vélez 2004).

Por lo tanto, en el congreso de Cambridge de 1985 (Iglesias 1989), la comunidad científica reveló su preocupación e interés por el estudio sobre las pérdidas de carga que están presentes en los pozos, ya que los estudios teóricos se estaban completando a través del tiempo.

Por lo anterior, uno de los avances relevantes en relación con la cuantificación teórica de las actividades de desarrollo en los pozos, surgió con los trabajos de Iglesias (1989), en los cuales, se dedujeron una serie de expresiones que describen el abatimiento, teniendo en cuenta que; una vez el pozo sea desarrollado, se formará una zona de desarenado más permeable que alcanzará una distancia con respecto al radio del pozo r_p , n veces mayor.

Dentro de ese orden de ideas, Pérez Franco (1995) describe la imagen general de un pozo para un acuífero confinado de la siguiente manera:

Zona del empaque de gravas (entre r_w y r_p).

Zona de desarenado (entre r_p y r_{da}).

Zona del acuífero sin alteraciones (entre r_{da} y r_o).

donde: r_w , distancia desde el eje del pozo a la tubería de revestimiento o rejilla.

r_p , distancia desde el eje del pozo hasta el límite exterior del empaque de grava.

r_{da} , distancia desde el eje del pozo hasta el comienzo de la formación acuífera no alterada.

r_o , radio de influencia.

Ahora bien, considerando que el flujo es no lineal, sin llegar a ser cuadrático o totalmente desarrollado, se presenta entre el radio turbulento r_T y el radio de Darcy r_D , donde r_D indica el comienzo de la zona donde el régimen es lineal (Pérez Franco 1995) y resultaría probable que la zona de desarenado se encuentre entre el radio turbulento r_T y el radio de Darcy r_D .

No obstante, de la misma manera, es probable también que dicha zona se encuentre entre el radio del pozo r_p y el radio turbulento r_T , es decir, donde el flujo se encuentra totalmente desarrollado (turbulento puro). Por otra parte, lógicamente no es posible que dicha zona se desarrolle donde el flujo se puede considerar lineal, o sea, más allá de r_D , cuando existe la componente no lineal en el abatimiento, a menos que el radio de Darcy sea menor que el radio del pozo ($r_D < r_p$) (Pérez Franco 1995).

02 CONSIDERACIONES GENERALES AL ANALIZAR EL FLUJO HACIA EL POZO

Para lograr un modelo simple que permita analizar las situaciones más frecuentes que se presentan en la realidad, se han supuesto a través del tiempo una serie de condiciones ideales que son las siguientes:

- a) El acuífero tiene un espesor constante.
- b) El pozo atraviesa todo el espesor del acuífero.
- c) El acuífero es homogéneo, isotrópico y de extensión infinita.
- d) El pozo solo recibe agua de todo el espesor del acuífero.
- e) El pozo de extracción no tiene ningún tipo de estructura de revestimiento (filtros, rejillas o camisas), en la zona comprendida del espesor saturado del acuífero.
- f) La superficie piezométrica del acuífero es horizontal, lo que quiere decir que no se tiene en cuenta el gradiente natural del flujo, o sea, las componentes verticales de la velocidad que, en los acuíferos freáticos, en ocasiones pueden ser considerables.
- g) Las líneas de corriente son radiales y están sobre un plano unidireccional horizontal.

Por otra parte, para efectos prácticos se puede eliminar de la imagen general del pozo el empaque de gravas, ahora bien, dicha simplificación de la misma manera es asumida por diversos investigadores e, incluso, en el aporte realizado por Iglesias (1989), en relación con la cuantificación de las actividades de desarrollo en un pozo y su influencia sobre el flujo radial hacia este.

03 FUNCIÓN DE DESARENADO Y PERMEABILIDAD

El concepto de factor de mejora de la permeabilidad $M_{K(r)}$ y, por consiguiente, de la función de permeabilidad $K_{(r)}$, fue adoptado y desarrollado por Iglesias (1989), teniendo en cuenta el intervalo $r_p - nr_p$. Dichos desarrollos se pueden expresar en la notación del autor y añadiendo las equivalencias de la componente no lineal (Pérez Franco 1995), de la siguiente manera:

$$M_{K(r)} = \frac{9 \left(\frac{\mu - 1}{n - 1} \right) F \cdot nr_p}{r} + 1 - \frac{9 \left(\frac{\mu - 1}{n - 1} \right) F}{5} ; \quad M_{K(r)} = \left(\frac{A}{r} + B \right)^2 \quad (1)$$

$$K_{Da} = K_D \cdot M_{K(r)} ; \quad T_{Da} = T_D \cdot M_{K(r)} ; \quad K_{Ta}^2 = \left(K_T \cdot M_{K(r)} \right)^2 ; \quad T_{Ta}^2 = \left(T_T \cdot M_{K(r)} \right)^2 \quad (2)$$

donde: μ , coeficiente de uniformidad.

F , fracción desarenada en el borde de la rejilla.

n , nro. de veces donde se prolonga la zona de desarenado partiendo desde el radio del pozo.

r_p , radio del pozo.

K_D, K_{Da} , conductividad hidráulica lineal y mejorada respectivamente.

K_T, K_{Ta} , conductividad hidráulica turbulenta y mejorada respectivamente.

T_D, T_{Da} , transmisibilidad hidráulica lineal y mejorada respectivamente.

T_T, T_{Ta} , transmisibilidad hidráulica turbulenta y mejorada respectivamente.

04 FLUJO NO LINEAL PERMANENTE EN UN ACUÍFERO CONFINADO Y DESARROLLADO

Antes que nada, considerando la generalización anterior sobre la imagen general de un pozo (figura 1) y denominando las variables asociadas a la zona desarenada como lo realizó Pérez Franco (1995), se tiene que:

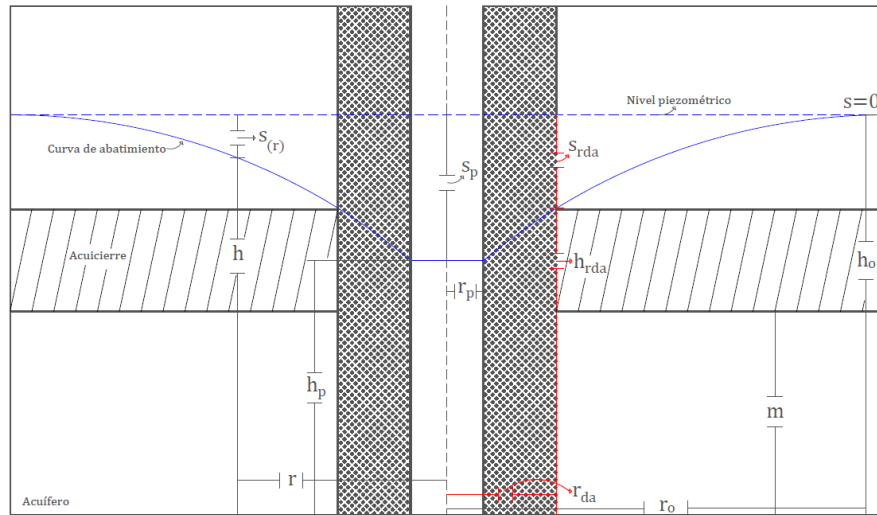


Figura 1. Imagen general de un pozo sin camisa y filtro artificial de grava en un acuífero confinado, considerando las actividades de desarrollo.

El abatimiento en cualquier punto del radio de influencia, utilizando la ley binómica de flujo, vendrá dado por una componente lineal y cuadrática (Pérez Franco 1995), por lo cual:

$$\frac{ds}{dr} = \frac{Q}{2\pi r T_D} + \frac{Q^2}{4\pi^2 r^2 T_T^2} \quad (3)$$

Ahora bien, como se sabe que el desarrollo en el pozo alcanza una distancia $nr_p = r_{da}$, si se integra a ambos lados entre los límites $(S_p - S_{r_{da}}$ y $r_{da} - r_p)$ y se introduce el nuevo valor de la transmisibilidad mejorada T_{Da} y T_{Ta} , resulta que:

$$\int_{S_{r_{da}}}^{S_p} ds = \int_{r_p}^{r_{da}} \frac{Q}{2\pi r T_{Da}} \cdot dr + \int_{r_p}^{r_{da}} \frac{Q^2}{4\pi^2 r^2 T_{Ta}^2} \cdot dr$$

De hecho, si se introduce la expresión de la función de transmisibilidad T_{Da} y T_{Ta}^2 (2), se tiene que:

$$S_p - S_{r_{da}} = \int_{r_p}^{r_{da}} \frac{Q}{2\pi T_D M_K(r)} \cdot \frac{dr}{r} + \int_{r_p}^{r_{da}} \frac{Q^2}{4\pi^2 T_T^2 M_K(r)^2} \cdot \frac{dr}{r^2}$$

Es importante mencionar que Iglesias (1989), resolvió la expresión de la componente lineal en presencia de la mejora de la permeabilidad. Dicha expresión en la notación del autor vendrá de la siguiente manera:

$$S_p - S_{r_{da}} = \frac{Q}{2\pi T_D} \phi_D$$

donde, la función lineal del pozo desarrollado es:

$$\phi_D = \frac{1}{B^2} \cdot \ln \left(\frac{A + Br_{da}}{A + Br_p} \right) + \frac{A}{B^2} \left(\frac{1}{A + Br_{da}} - \frac{1}{A + Br_p} \right) \quad (4)$$

Por otro lado, si se integra la componente cuadrática faltante, se obtiene lo siguiente:

$$\int_{r_p}^{r_{da}} \frac{Q^2}{4\pi^2 T_T^2 M_K(r)^2} \cdot \frac{dr}{r^2} = \frac{Q^2}{4\pi^2 T_T^2} \left\{ \frac{1}{3A} \left[\left(\frac{r_{da}}{A + Br_{da}} \right)^3 - \left(\frac{r_p}{A + Br_p} \right)^3 \right] \right\}$$

donde, la función no lineal del pozo desarrollado es:

$$\phi_T = \frac{1}{3A} \left[\left(\frac{r_{da}}{A + Br_{da}} \right)^3 - \left(\frac{r_p}{A + Br_p} \right)^3 \right] \quad (5)$$

Por consiguiente, el abatimiento dentro del intervalo $r_p - r_{da}$, vendrá dado por:

$$S_p - S_{r_{da}} = \frac{Q}{2\pi T_D} \cdot \phi_D + \frac{Q^2}{4\pi^2 T_T^2} \cdot \phi_T \quad (6)$$

Por otra parte, el abatimiento entre r_{da} y r_o , según Pérez Franco (1995), viene dado por:

$$S_{r_{da}} = \frac{Q}{2\pi T_D} \cdot \ln \left(\frac{r_o}{r_{da}} \right) + \frac{Q^2}{4\pi^2 T_T^2} \cdot \frac{r_o - r_{da}}{r_o \cdot r_{da}} \quad (7)$$

Ahora, si se suman las ecuaciones (6) y (7), correspondientes al abatimiento producido en la zona desarenada y en la zona no alterada, se tiene que:

$$S_p = \frac{Q}{2\pi T_D} \cdot \ln \left(E \cdot \frac{r_o}{r_p} \right) + \frac{Q^2}{4\pi^2 T_T^2} \left(\phi_T + \frac{r_o - r_{da}}{r_o \cdot r_{da}} \right) \quad (8)$$

donde, según Iglesias (1989), la función de entorno E, será: $E = \frac{e^{\phi_D}}{n}$

05 FLUJO NO LINEAL PERMANENTE EN UN ACUÍFERO LIBRE Y DESARROLLADO

Considerando de la misma manera la imagen general de un pozo adoptada anteriormente y las condiciones adoptadas por Dupuit (1863), resulta que:

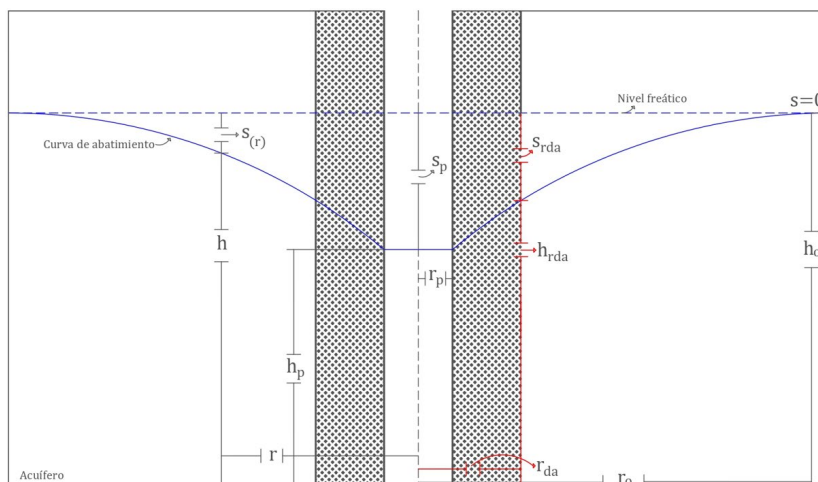


Figura 2. Imagen general de un pozo sin camisa y filtro artificial de grava en un acuífero libre, considerando las actividades de desarrollo.

Según los trabajos de Huyakorn y Dudgeon (1976), el abatimiento S_r , para diferentes condiciones de confinamiento, se compone de dos partes: una, denominada S_D , equivalente a la expresión lineal del abatimiento y, la otra, denominada S_{ND} , equivalente a la expresión no lineal del abatimiento. Expresando lo anterior en la notación deducida por Pérez Franco (1995), se tiene que:

$$S_p = S_{Dp} + S_{Tp} \quad (9)$$

Ahora bien, Iglesias (1989), encontró una expresión equivalente en régimen lineal en presencia de desarrollo, por lo que:

$$h_o^2 - h_p^2 = \frac{Q}{\pi K_D} \cdot \ln \left(E \cdot \frac{r_o}{r_p} \right) \quad (10)$$

No obstante, según Pérez Franco (1995), para formular la ecuación (10) en función del abatimiento y el espesor saturado, se puede deducir con facilidad que:

$$h_o + h_p = 2h_o - S_{Dp} \quad y \quad h_o - h_p = S_{Dp} \quad (11)$$

Por lo tanto, si se introduce las relaciones anteriores (11) en el primer miembro de la ecuación (10) y, si se despeja S_{Dp} , se tiene que:

$$S_{Dp} = \frac{Q}{2\pi K_D \left(h_o - \frac{S_{Dp}}{2} \right)} \cdot \ln \left(E \cdot \frac{r_o}{r_p} \right) \quad (12)$$

donde, Pérez Franco (1995), corroboró que la relación $(h_o - S_{Dp}/2)$, no era más que el espesor promedio del acuífero saturado, $(h_o + h_p)/2$. Ecuación que tiene similitud con la componente lineal de la ecuación (8) para acuíferos confinados.

Por otro lado, si se generaliza el segundo miembro de la segunda adición de la ecuación (9), en relación con los abatimientos producidos en la zona de desarenado y en la zona no alterada dentro del radio de influencia en régimen turbulento puro, se tiene que:

$$S_{Tp} = S_{T_{Ta}} + S_T$$

O sea que, para el segundo miembro del primer sumando $S_{T_{Ta}}$, si se introduce la expresión de la función de permeabilidad K_{Ta}^2 (2), en régimen turbulento puro (Pérez Franco 1995), resulta que:

$$h^2 dh = \frac{Q^2}{4\pi^2 K_T^2 \left(\frac{A}{r} + B \right)^4} \cdot \frac{dr}{r^2}$$

Si se integra la ecuación anterior entre los límites $(h_{rda} - h_p \text{ y } r_{da} - r_p)$, se tiene que:

$$h_{rda}^3 - h_p^3 = \frac{3Q^2}{4\pi^2 K_T^2} \cdot \phi_T \quad (13)$$

Ahora bien, para el segundo miembro del segundo sumando S_T , Pérez Franco (1995) obtuvo la siguiente expresión, ajustada por el autor para la zona comprendida entre r_{da} y r_o .

$$h_o^3 - h_{rda}^3 = \frac{3Q^2}{4\pi^2 K_T^2} \cdot \frac{r_o - r_{da}}{r_o \cdot r_{da}} \quad (14)$$

En este orden de ideas, si se suman las ecuaciones (13) y (14), resulta que:

$$h_o^3 - h_p^3 = \frac{3Q^2}{4\pi^2 K_T^2} \left(\phi_T + \frac{r_o - r_{da}}{r_o \cdot r_{da}} \right) \quad (15)$$

Pero, si se ajusta la ecuación (11) en relación con el abatimiento S_{Tp} , se obtiene lo siguiente:

$$h_o + h_p = 2h_o - S_{Tp} \quad y \quad h_o - h_p = S_{Tp} \quad (16)$$

Por lo tanto, si se introduce de nuevo las relaciones anteriores en el primer miembro de la ecuación (15) y, si se despeja S_{Tp} , se tiene que:

$$S_{Tp} = \frac{3Q^2}{4\pi^2 K_T^2 [(h_o + h_p)^2 - h_o \cdot h_p]} \left(\phi_T + \frac{r_o - r_{da}}{r_o \cdot r_{da}} \right) \quad (17)$$

Ahora, si se examina la ecuación (9) y se introducen los valores de S_{Dp} (12) y S_{Tp} (17), se puede concluir lo siguiente:

$$S_p = \frac{Q}{2\pi K_D \left(h_o - \frac{S_{Dp}}{2} \right)} \cdot \ln \left(E \cdot \frac{r_o}{r_p} \right) + \frac{3Q^2}{4\pi^2 K_T^2 [(h_o + h_p)^2 - h_o \cdot h_p]} \left(\phi_T + \frac{r_o - r_{da}}{r_o \cdot r_{da}} \right) \quad (18)$$

La ecuación anterior no es producto de aproximaciones como se acostumbra a realizar ($h_o + h \approx 2h_o$), cuando se considera que el espesor saturado del acuífero libre es lo suficientemente grande en relación con los abatimientos observados.

06 ANÁLISIS DE LAS EXPRESIONES EQUIVALENTES PARA LOS ACUÍFEROS CONFINADOS Y LIBRES

Como se sabe, las expresiones del abatimiento registrado en la cara del pozo, utilizando la ley binómica de flujo para acuíferos confinados y libres respectivamente, son:

$$S_p = \frac{Q}{2\pi T_D} \cdot \ln \left(E \cdot \frac{r_o}{r_p} \right) + \frac{Q^2}{4\pi^2 T_T^2} \left(\phi_T + \frac{r_o - r_{da}}{r_o \cdot r_{da}} \right) \quad (8)$$

$$S_p = \frac{Q}{2\pi K_D \left(h_o - \frac{S_{Dp}}{2} \right)} \cdot \ln \left(E \cdot \frac{r_o}{r_p} \right) + \frac{3Q^2}{4\pi^2 K_T^2 [(h_o + h_p)^2 - h_o \cdot h_p]} \left(\phi_T + \frac{r_o - r_{da}}{r_o \cdot r_{da}} \right) \quad (18)$$

Si se realiza un análisis somero a la ecuación (18), en relación con la componente lineal del acuífero libre, se puede observar, tal y como lo corroboró Pérez Franco (1995), que el término $(h_o - S_{Dp}/2)$ resulta ser el espesor promedio del acuífero saturado $h_{prD} = (h_o + h_p)/2$. En este orden de ideas, se puede corroborar lógicamente que el espesor promedio del acuífero saturado h_{prD} para la componente lineal, difiere con el denominado como espesor aparente h_{prT} , para la componente turbulenta, sin embargo, las expresiones obtenidas para los acuíferos confinados y libres resultan bastante similares.

Por lo anterior, se puede expresar ambas componentes de la siguiente manera:

$$h_{prD} = \frac{h_o + h_p}{2}$$

$$h_{prT} = (h_o + h_p)^2 - h_o \cdot h_p$$

Ahora, si se establece una relación entre las ecuaciones anteriores, resulta que:

$$h_{prT} = \frac{2h_{prD}[(h_o + h_p)^2 - h_o \cdot h_p]}{h_o + h_p} \quad (19)$$

07 CONCLUSIONES

Antes que todo, es importante mencionar que las expresiones obtenidas en régimen permanente, utilizando la ley binómica de flujo para acuíferos confinados y libres, resultan bastante similares; tanto para la componente lineal como para la turbulenta. No obstante, cabe resaltar la mayor similitud en relación con la componente lineal para ambos casos, por lo tanto, es posible utilizar la expresión lineal de un acuífero confinado para un acuífero libre, sustituyendo el valor de m por h_{prD} , tal y como lo sugirió Pérez Franco (1995) en su momento.

Por el contrario, para la componente cuadrática se observa una diferencia particular con respecto a la formulación obtenida para los acuíferos confinados, debido a la variación del espesor saturado del acuífero libre en relación con la distancia, teniendo en cuenta las suposiciones de Dupuit (1863).

Aunado a ello se puede enfatizar que las expresiones obtenidas para un acuífero libre no son producto de aproximaciones, como cuando se considera que el espesor promedio del acuífero saturado es lo suficientemente grande en relación con los abatimientos. Por lo anterior, se puede concluir que el espesor promedio del acuífero saturado h_{prD} , cuando el régimen es lineal, difiere del denominador como espesor aparente h_{prT} , cuando el régimen es turbulento puro en un acuífero libre.

Para finalizar, se puede mencionar que, con suma importancia, la función del pozo desarrollado ϕ_D y ϕ_T (lineal y no lineal) resulta ser diferente para ambos regímenes, además que, dicha función aparece de la misma manera para las formulaciones propuestas en los acuíferos confinados y libres.

08 REFERENCIAS

- Dupuit J.** (1863). "Études théoriques et pratiques sur le mouvement des eaux", Deuxieme edition, ISBN 9783642253874, Paris.
- Huyakorn P. and Dudgeon C. R.** (1976). "Investigation of two-regime well flow", Journal of Hydraulic Engineering, vol. 102, no. 9, pp. 1149–1165, ISSN (online): 2690-2524.
- Iglesias A.** (1989). "Métodos numéricos aplicados al diseño, equipado y desarrollo de pozos", Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Madrid. España
- Johnson E.** (1966). "Ground water and well", Johnson Division UOP Inc, Saint Paul, Minnesota. ISBN: 09780978779306

Pérez Franco D. (1995). "La explotación del agua subterránea. Un nuevo enfoque". Editorial Científico Técnica, ISBN 9589569749, Ciudad de la Habana.

Vélez M. (2004). "Hidráulica de aguas subterráneas", Universidad Nacional de Colombia, ISBN 9589352154, Colombia.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Juan David Rincón Vanegas <https://orcid.org/0000-0001-9932-3253>

Es el único autor, por lo tanto, realizó el artículo en su totalidad.

Determinación del diámetro económico de una tubería de impulsión de polietileno de alta densidad (PEAD)

Yaset Martínez Valdés

E-MAIL: yaset@civil.cujae.edu.cu

Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE). Departamento de Estructuras, Facultad de Ingeniería Civil.

Félix Riaño Valle

E-MAIL: riano@tesla.cujae.edu.cu

Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE). Departamento de Estructuras, Facultad de Ingeniería Civil.

Liz Acosta Caballero

E-MAIL: lizacostacaballero@gmail.com

Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE). Departamento de Estructuras, Facultad de Ingeniería Civil.

RESUMEN

Se presenta una metodología para obtener el diámetro económico de una tubería de impulsión de polietileno de alta densidad (PEAD) de un sistema fuente por bombeo para suministro de agua. La misma toma como punto de partida el concepto de Rango de Eficiencia Óptima del Sistema (REOS), de conjunto con nuevos conceptos, criterios y enfoques que se complementan para la obtención del diámetro económico de una conductora. El procedimiento propuesto incorpora en este análisis, la determinación de la presión nominal (PN) para cada tramo del perfil de la conductora y sus diámetros interiores en función de las particularidades del trazado de la tubería, incorporando a otras variables que dependen del tipo de instalación y su esquema de diseño. El procedimiento se ilustra con la solución de un problema práctico.

Palabras Claves: diámetro, económico, impulsión, metodología, tubería.

Determination of the optimum diameter of a high density polyethylene (HDPE) impulse pipe

ABSTRACT

A methodology is presented to obtain the economic diameter of a high-density polyethylene (HDPE) force main pipe from a pumped source system for water supply. As a starting point, it takes the concept of Optimum System Efficiency Range (OSER), together with new concepts, criteria and approaches that complement each other to obtain the economic diameter of a conductor. The proposed procedure incorporates in this analysis, the determination of the nominal pressure (PN) for each section of the conductor profile and its internal diameters depending on the particularities of the pipeline layout, incorporating other variables that depend on the type of installation and its design scheme. The procedure is illustrated with the solution of a practical problem.

KEYWORDS: diameter, economic, force main, methodology, pipe.

01 INTRODUCCIÓN

El uso del polietileno de alta densidad (PEAD) como material de las tuberías en los sistemas de abastecimiento de agua, viene desplazando a otros materiales tradicionalmente utilizados en el país para este tipo de servicio. Cuba cuenta en la actualidad con tres fábricas donde se producen este tipo de tuberías con diámetros de hasta 1200 milímetros, las cuales son demandadas desde las obras de grandes conductoras hasta las acometidas que dan servicio en las redes. De igual forma se va imponiendo su uso gradualmente en las tuberías de alcantarillado y drenaje pluvial. Son numerosas las ventajas del uso de este tipo de material, entre las que se destacan: mejores coeficientes de fricción, economía de construcción e instalación, compresibilidad, rapidez de instalación, compatibilidad y durabilidad (se estima un periodo de vida útil de 50 años).

Para calcular el diámetro óptimo o económico de una tubería de impulsión, así como su presión nominal de diseño, se debe realizar un análisis técnico-económico en el cual intervienen variables hidráulicas como: caudal, diferencia de presión, pérdidas de carga admisibles en la tubería, golpe de ariete; así como de otro tipo, a saber: material de la tubería, espesor, perfil longitudinal de la tubería, condiciones de ensayos de presión en el campo, costos relativos diámetros/presión nominal, costo de mano de obra y equipamiento, amortización, restricciones financieras como costos operativos de las estaciones de bombeo, intereses y costos actuales y futuros de la energía (Cabrera 1996).

El objetivo de la metodología propuesta es la determinación del diámetro económico de una tubería de impulsión de PEAD, material usado habitualmente en los sistemas fuente por bombeo para el abastecimiento de agua en nuestro país. La misma se fundamenta en el concepto de Rango de Eficiencia Óptima del Sistema (REOS) y en la selección de la presión nominal necesaria por tramos de tubería y sus respectivos diámetros interiores. Se articulan también otros aspectos esenciales tales como: costos de inversión, costos de operación y mantenimiento, rango de velocidades permisibles y eficiencia de los equipos de bombeo (conjunto bomba-motor). De esta manera se calcula el diámetro económico para el cual el costo anualizado total (CAT) del sistema es mínimo en el rango de eficiencia considerado (Martínez 2011). El procedimiento se aplica a la solución de un problema práctico con datos reales para el caso de un sistema fuente por bombeo con una demanda fija (caudal de bombeo constante) y servicio continuo.

02 DESARROLLO

Dependiendo del modo en que intervienen los diámetros en el cálculo de la sección hidráulica más económica de una conducción forzada, se pueden clasificar el proceso de optimización según: a) Formulación en diámetros continuos: En este caso se considera la aproximación de que los diámetros de las conducciones actúan como variables continuas y b) Formulación en diámetros discretos: Se considera únicamente la participación de diámetros disponibles comercialmente. Se trata por tanto de un conjunto discreto compuesto de valores estándares o comerciales. Ambos métodos difieren en la forma de evaluar los sumandos que integran la función de costos a minimizar (CAT), aunque el planteamiento económico es el mismo.

Está demostrado que para el caso del dimensionado económico de tuberías de impulsión, la solución óptima deberá contar con un diámetro único, y en consecuencia, el proceso de normalización subsiguiente hacia diámetros continuos, deberá consistir no ya en la partición de la tubería en dos tramos de diferentes diámetros, sino en comprobar cuál de los dos diámetros, inmediato inferior o inmediato superior al teórico obtenido, proporciona un resultado más económico (Pérez 1993).

La metodología que se propone establece un procedimiento analítico para la determinación del diámetro económico de una tubería de impulsión de PEAD y su REOS (Martínez 2011). El procedimiento está organizado por pasos de la manera siguiente:

1. Definición del rango de velocidades recomendable para la tubería
2. Determinación preliminar de la presión nominal de la tubería
3. Selección de los diámetros posibles a utilizar en la tubería
4. Definición de la presión nominal de diseño (PN) de la tubería
5. Determinación del Rango de Eficiencia Óptima del Sistema (REOS) y el diámetro económico de la tubería de impulsión
6. Asignación de la presión nominal por tramos de la tubería y sus respectivos diámetros interiores

Paso 1. Definición del rango de velocidades recomendable para la tubería

Los límites máximo y mínimo del rango de velocidades permisibles para una conducción, dependen de razones funcionales y energéticas (magnitud de las pérdidas de carga). Entre las primeras están, presiones mínimas y máximas en la conducción, ruidos, vibraciones, infrautilización de la conducción, depósitos de materias en suspensión, incrustaciones y los costos de mantenimiento entre otros. Teniendo en cuenta estos factores se han propuesto formulaciones para el cálculo de las velocidades límites aconsejables y rangos de velocidades recomendables o económicas, como también se les conoce (Cabrera 1996). En Cuba, para los proyectos de sistemas de conducción de agua con tuberías de PEAD, se establece utilizar el Instructivo para el diseño con tuberías de PEAD (INRH 2006).

Paso 2. Determinación preliminar de la presión nominal de la tubería

Para definir la presión nominal con carácter preliminar de la tubería, PN_p hay que tener en cuenta el desnivel general, ΔZ del sistema (diferencia de altura entre la sección inicial y final de la conducción), el cual servirá como valor mínimo de referencia para seleccionar del catálogo de un fabricante una presión nominal inmediata superior a la magnitud del ΔZ . Determinada la PN_p se procede a seleccionar los diámetros posibles dentro de esa clase de presión. Debe tenerse en cuenta que para este tipo de tuberías a mayor valor de PE (tipología de polietileno indicador de la calidad de la materia prima de fabricación) los costos de la conducción disminuyen (López 2012).

Paso 3. Selección de los diámetros posibles a utilizar en la tubería

Para la PN_p definida en el paso anterior, se procede a calcular los posibles diámetros a utilizar en la conducción. Empleando la Ecuación de Continuidad y el rango de velocidades recomendables (Paso 1), se tiene:

$$D = \left(\frac{4Q_D}{\pi V} \right)^{0,5} \quad (1)$$

Donde: D : diámetro interior teórico de la tubería de conducción principal, (m); Q_D : caudal de diseño del sistema, (m^3/s) y V : velocidad media de circulación en la tubería, (m/s).

Cuando se sustituye en la ecuación 1 la velocidad mínima del rango de velocidades permisibles, se obtendrá el diámetro teórico máximo posible para la tubería de impulsión. Por otro lado, al utilizarse en la referida ecuación la velocidad máxima del intervalo recomendable, se conseguirá el diámetro teórico mínimo posible para la conducción. Ambos diámetros teóricos servirán para acotar el rango de diámetros comerciales para la conducción, aproximando por exceso y por defecto para los

diámetros teóricos mínimo y máximo respectivamente. De esta manera se asegura el cumplimiento de las restricciones de velocidad establecidas. La cantidad de diámetros nominales posibles a emplear dependerá de la amplitud del rango de velocidades establecido, la magnitud del caudal y el espaciamiento entre los diámetros comerciales.

Paso 4. Definición de la presión nominal de diseño (PN) de la tubería

Establecido el rango de diámetros permisibles para la conducción, se procede a asignar la presión nominal para cada uno de ellos considerando la carga a presión inicial, $(P/\gamma)_i$, resultado de la sumatoria del ΔZ y las hf correspondientes. La carga a presión inicial es aquella que es necesaria en el inicio de la conductora para garantizar el gasto de diseño. En este cálculo se tiende a despreciar la carga a velocidad, dado que en el orden práctico es un valor significativo (Ej.: $v^2/2g = 0,204$ m para una velocidad de 2,0 m/s). Teniendo en cuenta que el ΔZ es igual para todas las variantes de diámetros, la asignación de la presión nominal de la tubería quedará solo en función de la magnitud de las pérdidas de carga calculada para cada diámetro. De esta manera, para el menor diámetro se obtiene la máxima hf y por consiguiente una mayor presión nominal necesaria y viceversa. Para definir la presión nominal de diseño correspondiente a cada diámetro se aproximará siempre por exceso. Las pérdidas de carga se calcularán a partir de la ecuación de Darcy-Weisbach con el coeficiente de fricción, f determinado por la fórmula de Swamee-Jain:

$$hf = 0.0826 f \frac{L_{eq}}{D^5} Q^2 \quad (2)$$

Donde: hf : pérdidas de carga en la conducción, (m); f : coeficiente de fricción de la tubería, (adim.); L_{eq} : longitud equivalente del sistema, (m); D : diámetro interior de la tubería, (m) y Q : caudal de circulación, (m³/s).

$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{\epsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{N_R^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (3)$$

Donde: ϵ : rugosidad absoluta de la tubería asociada al material, (m); D : diámetro interior de la tubería, (m) y NR : número de Reynolds que caracteriza el flujo en la conducción, (adim.).

Calculada la carga a presión inicial necesaria para cada diámetro del rango establecido, se procede a seleccionar la de diseño. Es oportuno destacar que las tuberías de PEAD se fabrican para diferentes presiones nominales en función de una misma plantilla de diámetro exterior, variando solo su espesor. En la producción de este tipo de tuberías, para un mismo diámetro exterior la sección interior de la tubería se va reduciendo a medida que se necesita una mayor presión nominal. De esta forma, a mayor PN se requiere un mayor espesor de tubería, lo que encarece el precio por metro lineal a pesar de que el diámetro exterior sea el mismo.

Tomando en cuenta lo anterior, se procede a la asignación de la PN de diseño para cada diámetro de modo que esta sea mayor que la requerida. Se recomienda que este proceso se inicie por el diámetro menor del rango. Si para este diámetro, su $(P/\gamma)_i$, resulta mayor que la asignada de forma preliminar, se deberá tomar la inmediata superior correspondiente al mismo diámetro exterior. Al realizar este cambio, el espesor aumenta y habrá que recalcular nuevamente las pérdidas de carga y la carga de presión inicial, pudiendo resultar en una nueva PN necesaria. Este proceso se repetirá hasta que se encuentre el diámetro interior cuya $(P/\gamma)_i$ sea menor que la PN de diseño de la tubería.

Si para el menor diámetro del rango, la carga a presión necesaria es menor que la presión de diseño, no es necesario realizar el proceso antes explicado.

Paso 5. Definición del Rango de Eficiencia Óptima del Sistema (REOS) y determinación del diámetro económico de la tubería de impulsión.

El Rango de Eficiencia Óptima del Sistema (REOS), se define como aquel que garantiza el conjunto de costos anualizados total mínimo del sistema para un diámetro nominal dado, en función de las variables hidráulicas y del sistema establecidas previamente. El diámetro óptimo será aquel que cumpla todas las restricciones técnicas, funcionales y económicas que tenga el menor costo anualizado total (CAT). En su definición intervienen los costos de inversión, energéticos y de operación y mantenimiento, reflejados en una sumatoria como la que se muestra:

$$CAT = C_i a_t + C_e + C_{o\&m} \quad (4)$$

Donde: CAT: costo anualizado total asociado a cada variante, (\$); C_i : costo de inversión de la conducción, (\$); a_t : factor de amortización de la inversión, (adim.); C_e : costo anual de la energía consumida (\$) y $C_{o\&m}$: costo anual de operación y mantenimiento de la aducción, (\$).

El monto de inversión se refieren de manera general a los costos de: tuberías; movimientos de tierra; acarreo de material de préstamo y material sobrante; el colchón de arena para el asentamiento de la tubería; levantamiento y reposición de pavimentos; los accesorios hidráulicos y de otra índole; colocación de las tuberías y juntas; bloques de apoyo y anclaje; camisas de protección y obras de cruce; construcción de registros para inspección y medición, interconexión y para válvulas de desagüe, cierre y ventosas; protección contra el golpe de ariete; adquisición de terrenos; proyectos y fiscalidad; la(s) estación(es) de bombeo. Las variables que intervienen en la relación entre el costo por metro lineal y el diámetro de las tuberías son las siguientes: el tipo de material y el espesor; los accesorios y uniones; el tipo de terreno y la profundidad de las zanjas; los costos de excavación y movimientos de tierras; las afectaciones en las vías públicas, autorizaciones, medidas de seguridad e higiene, etc. (Cabrera 1996) (Pérez 1993).

Para el cálculo del costo de inversión a nivel de anteproyecto, solo se considerará el relativo al de la inversión de la tubería de impulsión. La decisión de no incluir otros tipos de costos, se explica por el poco peso significativo que pueden tener estos en el monto de inversión total, máximo en este tipo de sistemas que se caracterizan por tener grandes longitudes de conducciones y diámetros relativamente grandes (Fuentes 2007). Tomando en cuenta estas consideraciones, el costo de inversión quedará planteado por la ecuación:

$$C_i = p_c L \quad (5)$$

Donde: C_i : costo total de la inversión, (\$); p_c : precio por metro lineal de tubería para un diámetro dado, (\$/ml) y L : longitud de la conductora, (m).

Por otra parte, debe advertirse que los costos de inversión se producen en el momento en que se acomete la construcción de la obra (tiempo de ejecución), mientras que los costos energéticos y de operación y mantenimiento se encuentran distribuidos en su tiempo de vida útil. Para compararlos todos tienen que ser referidos a una misma base temporal: año cero (costo anualizado total, CAT). Para anualizar el costo de inversión durante el periodo de vida útil de la obra, se utiliza el factor de amortización que se expresa como (Pulido et al. 2006):

$$a_t = \frac{(1+r)^n r}{(1+r)^n - 1} \quad (6)$$

Donde: a_t : factor de amortización, (adim.); r : tasa de interés para el proyecto, (adim.) y n : tiempo de amortización de la inversión en años, (adim.).

El tiempo de vida útil para las tuberías de PEAD en los proyectos de abastecimiento fuente por bombeo se estima en 50 años (INRH 2006). Como resultado, las anualidades que se obtienen al multiplicar los costos de inversión por el factor de amortización, representan, desde el punto de vista técnico, el costo anual que supone la explotación del sistema en condiciones plenas de operación durante toda la vida útil del mismo (Martínez 2007).

El costo de la energía consumida para el trasiego del caudal depende del precio de la tarifa eléctrica, la cual, está en función del tipo de potencia contratada y las zonas horarias de la demanda. Las variaciones del costo de la estación de bombeo y las tasas de potencia contratada son, en general, poco significativas para diámetros similares. De esta manera, solo se considerará, la inversión relativa a la conductora y los gastos energéticos (López-Cortijo 2008). El cálculo del costo energético anualizado a nivel de anteproyecto se realiza mediante la expresión 7 (Martínez 2011):

$$C_e = \frac{\gamma Q (\Delta Z + hf)}{\eta_{eb}} t_b t_r = \frac{\gamma Q (\Delta Z + hf)}{\eta_{eb}} (t_{bm} t_{rm} + t_{bd} t_{rd} + t_{bp} t_{rp}) \quad (7)$$

Donde: C_e : costo energético anualizado, (\$); γ : peso específico del agua, (N/m³); Q : caudal de diseño de la conductora, (m³/s); ΔZ : desnivel topográfico del sistema, (m); hf : pérdidas de carga en la conducción, (m); η_{eb} : eficiencia del equipo de bombeo o equipo de bombeo equivalente, (adim.); t_b : tiempo de bombeo anual por horarios de demanda, (h); t_r : precio de la tarifa eléctrica contratada durante los intervalos de demanda, (\$/kWh); t_{bm} : tiempo de bombeo anual en el periodo de la madrugada (10:00 pm.-6:00 am.), (h); t_{bd} : tiempo de bombeo anual durante el periodo diurno (6:00 am.-6:00 pm.), (h); t_{bp} : tiempo de bombeo anual en el periodo del pico eléctrico (6:00 pm.-10:00 pm.), (h); t_{rm} : precio de la tarifa eléctrica contratada durante el periodo de la madrugada, (\$/kWh); t_{rd} : precio de la tarifa eléctrica contratada durante el periodo diurno, (\$/kWh) y t_{rp} : precio de la tarifa eléctrica contratada durante el periodo del pico eléctrico, (\$/kWh).

Para la estimación del costo de operación y mantenimiento para este tipo de sistemas hidráulicos, se han empleado varios criterios, de los cuales, aquellos que lo calculan en función del costo de instalación y del costo energético son los más aceptados. En este sentido, Featherstone y El-Jumaily (1983) proponen estimarlo como el 8% del costo de la energía consumida por la instalación, dependiendo de las características del sistema de bombeo y las condiciones de operación de este.

Todos estos costos tienen tendencias de crecimiento inverso, lo cual hace que, para cualquier sistema de conducción, la función de costo global (CAT) presente en general un mínimo dentro de los límites impuestos por las consideraciones del rango de velocidades permisibles. El diámetro que corresponde al menor CAT se denomina diámetro económico o diámetro óptimo, D_{opt} , como se puede observar en la figura 1.

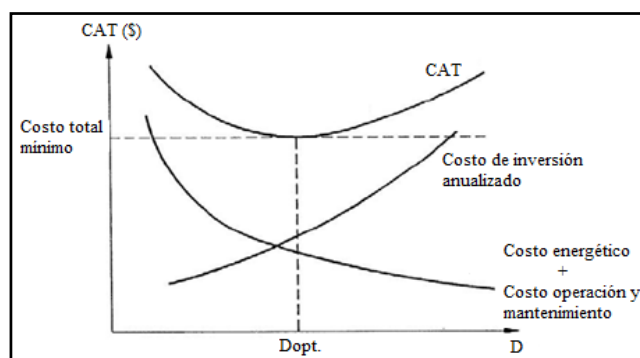


Figura 1. Curvas características de los costos de inversión, energético y de operación y mantenimiento anualizados en función del diámetro de la conducción.

Puede ocurrir que la tendencia de los costos anualizados total para el conjunto de diámetros seleccionados, no resulte una curva en que el costo mínimo quede perfectamente definido, sino que la tendencia se refleje en una curva ascendente o en una curva descendente para todo el rango de diámetros que se analiza. Si se diera el caso de una curva descendente, habría que analizar diámetros mayores de tubería hasta lograr que se produzca una inflexión con pendiente ascendente, realizando el proceso contrario para el caso de una curva ascendente. De esa forma, para ambas variantes, quedará verificado cual es el mínimo costo anualizado total y por consiguiente, se obtendrá el diámetro económico. Es necesario destacar que los análisis anteriores son válidos siempre que se cumplan los requerimientos de velocidades máximas y mínimas establecidas en el paso 1 de la metodología.

Para calcular el REOS correspondiente a cada diámetro de la conducción, se comenzará asumiendo un valor máximo práctico de la eficiencia del equipo de bombeo o equipo de bombeo equivalente de un 80%. Se entiende como eficiencia del equipo de bombeo equivalente, la eficiencia global del conjunto de equipos de bombeo instalados en una estación de bombeo, solo si son bombas iguales y tienen un acople al sistema de manera simétrica (caso de bombas iguales acopladas en paralelo). Este proceso continúa disminuyendo la eficiencia, -se propone que las variaciones sean del 1%-, hasta llegar a un valor de esta para el cual se produce un cambio de diámetro hacia el comercial inmediato superior.

Esta tendencia es esperada ya que, a medida que se reduce el valor de la eficiencia, el valor del diámetro económico aumenta. El valor precedente a esta eficiencia límite se considera el mínimo del REOS que se analiza, siendo la misma a su vez, el valor máximo del siguiente. Siguiendo este razonamiento, el diámetro óptimo a seleccionar será aquel que tenga el mayor REOS factible desde el punto de vista práctico. Este procedimiento difiere conceptualmente de los tradicionalmente citados en la literatura, los cuales se basan en asumir un único valor de eficiencia, -en algunos casos sin aclarar a que eficiencia se refiere y en otros como la eficiencia de la bomba, lo cual constituye un error conceptual-, para calcular el costo energético como paso previo para la determinación del diámetro óptimo.

Paso 6. Asignación de la presión nominal por tramos de la tubería y sus respectivos diámetros interiores.

Calculado el diámetro óptimo para la conducción y su correspondiente REOS, se procede a la asignación de la presión nominal por tramos de la tubería y sus respectivos diámetros interiores. Para esto hay que tener en cuenta el perfil longitudinal del trazado de la tubería, con el fin de verificar los estacionados singulares (puntos de mayor y menor cota topográfica) y revisar si la PN definida para

el diámetro económico se mantendrá durante todo el trazado de la conducción. Pudiera suceder que se inicie el trazado de la conductora con una PN y en un tramo hacia aguas abajo, producto de una depresión en su perfil longitudinal, se necesite una presión de trabajo mayor que la inicial. También se puede presentar el caso contrario, en el cual, durante un intervalo ascendente en el trazado de la tubería, pudiera reducirse la PN de trabajo debido a una menor demanda de presión interna en dicho tramo.

Para realizar este proceso se realizará el cálculo de la rasante piezométrica desde aguas abajo hasta aguas arriba, a partir del valor conocido de esta en la sección final de la tubería (sección aguas abajo con descarga libre a la atmósfera). La determinación de la cota piezométrica y la carga a presión, se efectuará para secciones de la tubería distanciadas cada 12 m (para hacerlas coincidir con la longitud de los tramos de las tuberías de PEAD de fabricación nacional), calculándose esta última a partir de la diferencia entre la cota piezométrica y la cota del centro de la tubería (línea de corriente central) para cada sección. Con estos valores de carga a presión cada 12 m se irá verificando cuando realizar el cambio de la PN para cada tramo en la tubería, atendiendo a las características del terreno en el trazado de la conducción.

Un cambio de la presión de diseño a lo largo de la tubería tendrá un impacto económico favorable en la inversión, en comparación con la práctica de proyecto de mantenerla constante. Al asignar a cada tramo del perfil de la tubería la PN necesaria, se pueden reducir los costos de la conducción (tramos de tubería con un espesor menor) y los costos energéticos (un menor espesor conlleva a un mayor diámetro interior, menores pérdidas de carga y por ende un menor costo energético). Desde el punto de vista hidráulico, al asumir tramos con diferentes PN y sus respectivos diámetros interiores, deberá analizarse toda la conducción como un sistema de tuberías en serie, aunque el diámetro exterior se mantenga igual a lo largo de todo el trazado.

A continuación, se aplica la metodología propuesta a un ejemplo práctico para garantizar una mejor comprensión del procedimiento.

CÁLCULO DEL DIÁMETRO ÓPTIMO DE UNA TUBERÍA DE IMPULSIÓN DE PEAD.

Datos del sistema fuente: Caudal de diseño, $Q_D = 91$ L/s; material de la tubería de impulsión: Polietileno de Alta Densidad (PEAD); rugosidad absoluta de la tubería, $\epsilon = 0,0000025$ m; Longitud equivalente de la tubería de impulsión, $L_{eq} = 5100$ m; cota piezométrica inicio de la conductora, $CP_i = 80,45$ m; cota piezométrica final de la conductora (cota piezométrica del tanque), $CP_f = 153$ m; $\Delta Z = 72,55$ m y viscosidad cinemática (agua), $\nu = 10^{-6}$ m²/s. El caudal de bombeo se considerará constante durante un servicio continuo de 24 horas. El sistema fuente por bombeo está compuesto por una estación de bombeo (una sola bomba sumergible), una conductora y un tanque de distribución soterrado.

Paso 1. Definición del rango de velocidades recomendable para la tubería

Siendo el material de la tubería de impulsión PEAD se tomará como rango de velocidades permisibles: 0,6-1,8 m/s, según lo establecido en el Instructivo para el diseño con tuberías de PEAD para el caso del trasiego de agua limpia (INRH 2006).

Paso 2. Determinación preliminar de la presión nominal de la tubería

Tomando como referencia el catálogo nacional de tuberías de PEAD de fabricación nacional, se puede observar que para la calidad PE-100 del material, las PN que se fabrican van desde PN 5 hasta PN 16 atm (INRH 2006). Este tipo de tipología (PE-100) es la que se establece para tuberías que

trabajan en conducciones forzadas. A partir del $\Delta Z = 72,55$ m se selecciona de manera preliminar una PN de 8 atm, lo cual sería equivalente a una presión nominal de diseño de 81,55 m.c.a.

Paso 3. Selección de los diámetros posibles a utilizar en la tubería

Definido el rango de velocidades recomendables y trabajando con la ecuación 1, se procede a determinar el rango de diámetros teóricos: 253,7 a 439,4 mm. Tomando como referencia la PN 8, los diámetros posibles a seleccionar son: 284,9, 321,1, 361,8 y 407,1 mm, para los respectivos diámetros exteriores: 315, 355, 400 y 450 mm.

Paso 4. Definición de la presión nominal de diseño (PN) de la tubería

Precisados los diámetros interiores para la PN 8, se procede a asignar la presión nominal que deberá tener cada diámetro del rango a partir del cálculo de la carga a presión inicial, $(P/\gamma)_i$. Estos resultados se muestran en la tabla 1. Para comprobar si es válido desde el punto de vista práctico despreciar la carga a velocidad, solo basta con calcular la velocidad para el menor diámetro del rango de diámetros posibles (el primero del listado de la tabla 1), obteniéndose: $v = 1,427$ m/s y $v^2/2g = 0,104$ m (0,106% representativa de la carga total).

Tabla 1. Asignación de la presión nominal para cada diámetro.

$D_{ext.}$ (mm)	$D_{int.}$ (PN 8) (mm)	N_R (adim.)	f (adim.)	hf (m)	$(P/\gamma)_i = \Delta Z + hf$ (m)	PN asignada (atm.)
315	284,9	406685,85	0,01371	25,48	98,04	10
355	321,1	360837,12	0,01399	14,30	86,85	10
400	361,8	320245,44	0,01428	8,04	80,59	8
450	407,1	284610,17	0,01459	4,55	77,10	8

Debido a que para los diámetros de 284,9 y 321,1 mm se produjo un cambio de PN de 8 a 10 atm., se procede a seleccionar los nuevos diámetros interiores para esa nueva PN y volver a calcular la carga a presión inicial para asignar la PN necesaria (véase tabla 2).

Tabla 2. Asignación de la PN para los diámetros interiores de 284,9 y 321,1 mm.

$D_{ext.}$ (mm)	$D_{int.}$ (PN 10) (mm)	N_R (adim.)	f (adim.)	hf (m)	$(P/\gamma)_i = \Delta Z + hf$ (m)	PN asignada (atm.)
315	277,6	417380,40	0,01365	28,89	101,44	10
355	312,8	370411,76	0,01393	16,23	88,78	10

Paso 5. Determinación del Rango de Eficiencia Óptima del Sistema (REOS) y el diámetro económico de la tubería de impulsión

Para la determinación del REOS para cada diámetro y la selección del diámetro económico de la conductora, será necesario calcular los diferentes costos que componen el costo anualizado total, CAT. En la tabla 3 se presenta la relación de precios por metro lineal de las tuberías de PEAD de fabricación nacional para los diámetros exteriores definidos en el paso 3 con sus respectivas presiones de diseño.

Tabla 3. Relación de precios por metro lineal en función del Dext. y la PN.

$D_{ext.}$ (mm)	315	355	400	450
PN asignada (atm.)	10	10	8	8
Precio (\$/mL)	78,56	101,57	105,45	137,44

Para calcular el factor de amortización se asume una tasa de interés del 8% y una vida útil para la conductora de 50 años. Sustituyendo estos valores en la expresión 6 se encuentra un valor de a_t de 0,0817.

Empleando la expresión 7 se procede a determinar el costo energético utilizando la tarifa eléctrica **M-1A. Tarifa de media tensión con actividad continua** (20 horas y más servicio continuo), establecida por la Unión Eléctrica del Ministerio de Energía y Minas (UE-Minem 2018). El precio de las tarifas eléctricas son las siguientes: en el horario de la madrugada (10:00 pm.-6:00 am.) es de 0,028 \$/kWh; en el horario del día (6:00 am.-6:00 pm.) es de 0,042 \$/kWh y en el horario del pico eléctrico (6:00 pm.-10:00 pm.) es de 0,083 \$/kWh. Obtenido este, se procede a calcular el costo de operación y mantenimiento como el 8% de este valor.

Para el cálculo del REOS se comienza evaluando diferentes valores de la eficiencia del equipo de bombeo a partir del valor de 0,8 como valor máximo práctico, hasta encontrar aquel valor de eficiencia que haga que se produzca un cambio de diámetro. En la tabla 4 se presentan el CAT y sus componentes para una eficiencia del equipo de bombeo del 80%. Observe que no es factible analizar un diámetro menor de 277,6 mm pues quedaría fuera del rango de velocidades permisibles.

Tabla 4. Costos de inversión anualizado, energético, operación y mantenimiento y CAT para una eficiencia de 80%.

$D_{ext.}(mm)$	$D_{int.}(mm)$	$C_i(\$)$	$C_i \cdot a_t(\$)$	$C_e(\$)$	$C_{o\&m}(\$)$	$CAT(\$)$
315	277,6	400656	32733,59	43796,69	3503,73	80034,02
355	312,8	518007	42321,17	38328,33	3066,27	83715,77
400	361,8	537795	43937,85	34792,88	2783,43	81514,17
450	407,1	700944	57267,12	33287,30	2662,98	93217,41

Siguiendo el procedimiento para otros valores menores de eficiencia se obtienen los siguientes resultados:

- El diámetro de menor CAT fue el de 277,6 mm ($D_{ext.} = 315$ mm) para un REOS de 80% ($CAT = 80034,02$ \$) a 70% ($CAT = 86791,22$ \$).
- Para un REOS de 69% a 10%, el diámetro económico pasa a ser el de 361,8 mm ($D_{ext.} = 400$ mm) ($CAT = 87504,59$ \$ y 344548,37 \$ para las eficiencias de 69% y 10% respectivamente).
- Finalmente calculando un REOS hipotético de 9% a 1%, el diámetro óptimo será el de 407,1 mm ($D_{ext.} = 450$ mm) obteniéndose un $CAT = 376825,25$ \$ para la eficiencia de 9% y un $CAT = 2933290,27$ \$ para la eficiencia de 1%.
- Para el rango teórico de 100% a 81%, se puede comprobar que el diámetro económico sigue siendo el de 277,6 mm ($D_{ext.} = 315$ mm), obteniéndose un $CAT = 70573,93$ \$ para la eficiencia de 100% y un $CAT = 79450,06$ \$ para la eficiencia del 81%.
- Contrario al comportamiento habitual de la curva de CAT vs. D (véase figura 1) descrito ampliamente en la literatura, al cual se ha hecho referencia anteriormente; para el diámetro de 400 mm, se obtiene una disminución del CAT, invirtiendo el comportamiento creciente, el cual vuelve de nuevo a recuperarse para el diámetro de 450 mm. La razón de esto reside en una ruptura de la relación D vs precio tubería vs. PN para los diámetros que se analizan, debido a que estos tienen PN diferentes para el mismo diámetro exterior, lo cual influye en el costo de inversión. En este sentido vale la pena recordar que para un mismo diámetro exterior, a medida que la PN aumenta, el espesor necesario será mayor, lo cual se traduce en un mayor costo por metro lineal de tubería. Este fenómeno de dos mínimos en la solución global, solo es posible cuando se realiza un análisis de este tipo donde interviene el factor de la PN o clase de la tubería,

como es el caso de las tuberías de PEAD, aspecto este no tenido en cuenta en los análisis tradicionales para el cálculo del diámetro económico de una tubería.

Paso 6. Asignación de la presión nominal por tramos de la tubería y sus respectivos diámetros interiores

Teniendo en cuenta el perfil longitudinal del trazado de la tubería, se procede a identificar los estacionados singulares (puntos de mayor y menor cota topográfica) con el objetivo de realizar la asignación de la presión nominal por tramos de la tubería y sus respectivos diámetros interiores. El perfil está representado por 426 estacionados equidistantes cada 12 m, determinándose 15 secciones de cambio donde se produce una modificación de la PN para un tramo de la tubería, producto de variaciones en la pendiente del terreno (véase figura 2).

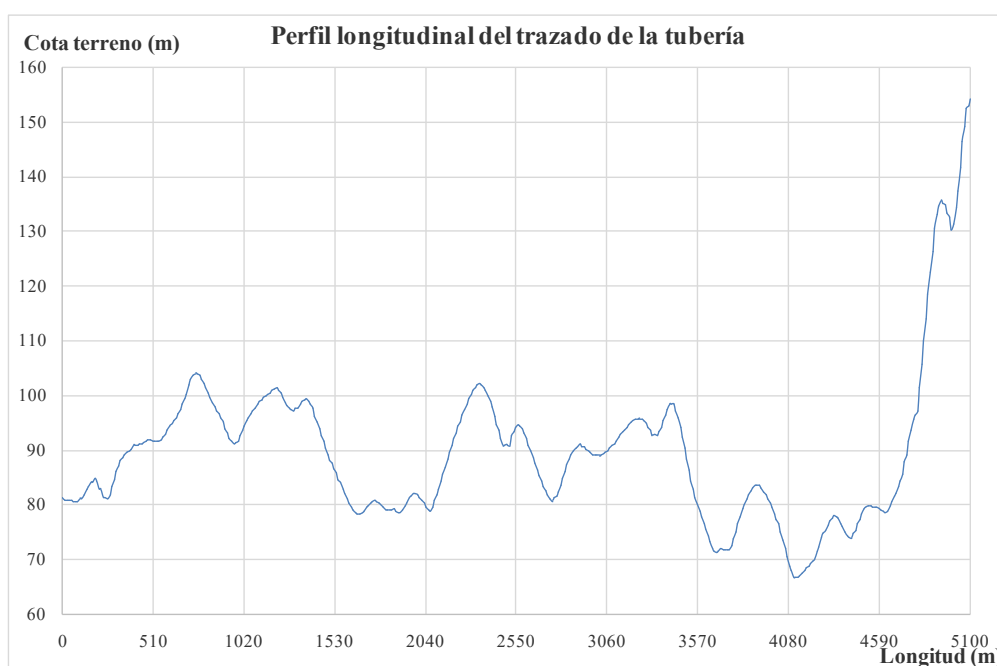


Figura 2. Perfil longitudinal del trazado de la conductora.

Los estacionados 0 (0 + 00 m) y 426 (5100 + 00 m) se corresponden con la sección inicial y final de la tubería, respectivamente. En la tabla 5 se muestra esta información detallada.

Tabla 5. Información del perfil longitudinal de la tubería y sus características hidráulicas.

Secciones de cambio	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Estación (m)	636,0	912,0	1020,0	1476,0	2160,0	2688,0	2808,0	3564,0	3816,0
Cota centro tubería (m)	94,97	93,03	93,54	89,28	87,48	83,48	83,80	79,07	78,26
Cota piezométrica (m)	176,05	174,67	174,06	171,78	167,91	165,27	164,59	160,81	159,39
(P/γ) (m)	81,09	81,65	80,52	82,51	80,43	81,80	80,79	81,74	81,12
Secciones de cambio	10	11	12	13	14	15	Sección inicial		Sección final
Estación (m)	4008,0	4296,0	4392,0	4464,0	4776,0	4824,0	0,0		5100,0
Cota centro tubería (m)	76,31	75,36	74,00	75,44	94,74	104,69	80,45		153,00
Cota piezométrica (m)	158,43	156,79	156,31	155,91	154,35	154,13	179,66		153,00
(P/γ) (m)	82,11	81,43	82,31	80,47	59,61	49,44	99,21		0,00

En la tabla 6 se presenta la información sobre la cantidad de tramos de tubería con sus respectivos PN y sus longitudes por tramos y total. Bajo este criterio es posible utilizar hasta cuatro PN distintas a lo largo del trazado de la conductora (PN 10, 8, 6 y 5), utilizando el mismo diámetro exterior de 315

mm y asignándole los diámetros interiores a cada tramo en función de la presión nominal. De esta manera, quedan definidos que se utilizarán 179 tubos de PN 10, 218 de PN 8, cuatro de PN 6 y 24 de PN 5. Entre paréntesis se señalan las secciones de cambio y sección inicial o final de la tubería que acotan la distancia de cada intervalo entre estas.

Tabla 6. Longitudes parciales y total de cada tramo con su asignación de la PN.

PN asignada tramo (atm.)	$D_{ext.}$ (mm)	$D_{int.}$ (mm)	L_1 (m)	L_2 (m)	L_3 (m)	L_4 (m)	L_5 (m)	L_6 (m)	L_7 (m)	L_{total} (m)
10	315	277,6	624,00 (sección inicial-1)	108,00 (2-3)	684,00 (4-5)	120,00 (6-7)	252,00 (8-9)	288,00 (10-11)	72,00 (12-13)	2148,00
8	315	284,9	276,00 (1-2)	456,00 (3-4)	528,00 (5-6)	756,00 (7-8)	192,00 (9-10)	96,00 (11-12)	312,00 (13-14)	2616,00
6	315	290,7	48,00 (14-15)							48,00
5	315	296,9	288,00 (15-sección final)							288,00

03 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para el diámetro económico de la conductora de 277,6 mm ($D_{ext.} = 315$ mm) se obtiene un REOS de 100% a 70%. En este sentido, si se garantiza que se seleccionen equipos de bombeo con una eficiencia dentro de ese rango, se asegurará que este sea el diámetro óptimo para la conducción. Por ejemplo, una electrobomba sumergible con los datos que se especifican, puede tener un rango de eficiencia del conjunto de 70 a 74,7%. Se han determinado para los otros tres posibles diámetros para la conducción sus respectivos REOS.

Para un mismo diámetro económico, es evidente que en la medida que se aumenta la eficiencia del equipo de bombeo el CAT disminuye. Este incremento de eficiencia, pudiera representar un valor que compense el incremento de costo por concepto del pago de una bomba más eficiente. Asumiendo un valor de eficiencia promedio de 72,3% para el equipo de bombeo, la solución propuesta por el nuevo método arroja un $CAT = \$79777,38$, pudiéndose alcanzar un ahorro de la solución de \$5294,17 al año (6,22%) cuando se compara con la solución clásica (PN 10, $D_{ext.} = 315$ mm, $D_{int.} = 277,6$ mm, $CAT = \$85071,55$) que se obtiene en el paso 5. El desglose de este ahorro en sus componentes queda de la siguiente manera: $C_i a_t = \$4165,40$ (12,72%); $C_e = \$1045,15$ (2,16%) y $C_{o\&m} = \$83,61$ (2,16%).

La conductora estará compuesta por 16 tramos de distintas PN (de 10 a 5 atm.), las cuales se irán alternando a lo largo de esta, en función de la topografía del trazado de la aducción. Las longitudes totales de cada uno de estos tramos en función de su PN son: PN 10: 2148,00 m (42,12% de la longitud total), PN 8: 2616,00 m (51,29%), PN 6: 48,00 m (0,94%) y PN 5: 288,00 m (5,65%). Se mantendrá durante todo el trazado de la tubería el mismo diámetro exterior de 315 mm. El diámetro interior de cada tramo estará en función de la PN asignada, resultando una conductora cuya analogía es un sistema de tuberías en serie. En términos generales, es importante subrayar que la magnitud de este ahorro vendrá dada por diferentes factores técnicos y topográficos particulares de cada proyecto.

Como es conocido, la longitud del trazado no influye en la determinación del diámetro económico, pero una mayor longitud de la conductora conlleva a un incremento de este ahorro. A medida que la eficiencia del sistema de bombeo aumenta, disminuye el ahorro potencial que se puede conseguir. Un perfil longitudinal de la tubería con pendiente creciente a todo lo largo del mismo, implica un mayor ahorro posible, reduciéndose este, con el aumento de las inflexiones en la vertical. Teniendo

en cuenta esto último, para el ejemplo en cuestión, se puede alcanzar un ahorro en el costo de inversión global y anualizado ($C_i \cdot a_t$) de \$50984,08 (12,72%) y \$4165,40 (12,72%) respectivamente, debido al cambio de la PN de 10 a 8, 6 y 5 atm. en una longitud total de 2952 m (57,88% de la longitud de la conductora) cuando se compara con los resultados de la solución clásica. En este sentido, se observa que cuanto mayor es la relación entre la suma de las longitudes totales de las PN diferentes a la PN relativa al diámetro óptimo obtenida en el paso 5, mayor será el ahorro global que se puede conseguir.

Existe un aspecto técnico relativo a la soldadura térmica para la unión de los diferentes tramos con diferentes espesores. Si bien está descrito en la literatura que por el método de soldadura a tope (rango de utilización: 90 a 1600 mm) este proceder no es aconsejable, si es posible realizarlo utilizando la tecnología de electrofusión, mediante el empleo de accesorios electrosoldables para un rango de diámetros exteriores de 20 a 800 mm (AseTub 2010). Si se desea trabajar con la técnica de soldadura a tope (termofusión), -la técnica más empleada en nuestro país en los proyectos de conductoras-, es posible diseñar un accesorio hidráulico con la tipología de una expansión o contracción gradual (según como se le coloque teniendo en cuenta el sentido del flujo) que tendrá un espesor en la sección inicial y otro en la final. En la literatura consultada no se reporta un accesorio hidráulico con estas características diseñado para tal fin.

La función de este accesorio es garantizar como elemento de conexión, el cambio de espesor entre los diferentes tramos de distintas PN, lo cual permite como se ha apuntado, a tener una conducción con varios tramos de PN ajustadas a su presión de trabajo, con el consabido ahorro económico. Para el ejemplo resuelto sería necesario un total de 15 accesorios de este tipo: siete para cambio de PN de 10 a 8 atm. (expansión gradual), seis para cambio de PN de 8 a 10 atm. (reducción gradual), uno para cambio de PN de 8 a 6 atm. (expansión gradual) y otro para realizar un cambio de PN de 6 a 5 atm. (expansión gradual).

04 CONCLUSIONES

La metodología que se presenta permite determinar el diámetro económico de una tubería de impulsión de PEAD, las cuales se utilizan habitualmente en los sistemas fuente por bombeo en Cuba. Con el procedimiento propuesto, se logra un nuevo enfoque que se desvincula un tanto del planteamiento conocido del proceso de optimización económica del diseño de una conductora, al lograr determinar cuál es el Rango de Eficiencia Óptima del Sistema (REOS) propio de cada diámetro, y de ese modo, poder determinar cuál es el diámetro económico a utilizar en una aducción por bombeo.

Se demuestra que a medida que el REOS sea mayor el CAT será menor, poniéndose de manifiesto que para cada REOS existe un diámetro económico determinado. En el presente trabajo, únicamente se ha pretendido hacer un planteamiento general del procedimiento analítico para la determinación del diámetro óptimo de una tubería de impulsión de PEAD, sin llegar a resolverlo de manera exhaustiva, contemplando variables muy específicas que intervienen en el diseño hidráulico y que, como se ha apuntado, no intervienen en la definición de la solución óptima. En este sentido, los criterios principales que inciden en el proceso de selección son: el costo anualizado total (CAT) y el Rango de Eficiencia Óptima del Sistema (REOS).

Se presentan además nuevos enfoques, criterios y formulaciones que complementan este objetivo, a saber: rango de velocidades y de diámetros recomendables para tuberías de PEAD, definición preliminar de la presión nominal de la tubería, formulación de la ecuación del costo

anualizado total y sus componentes, y proceso de asignación de la presión nominal por tramos de la conductora y sus respectivos diámetros interiores. La selección de las PN según las necesidades de cada tramo de la tubería de impulsión, contribuye de manera notable a disminuir el costo anualizado total del proyecto. Como un aporte del trabajo, se propone la utilización de un nuevo accesorio hidráulico cuya tipología es equivalente a una expansión o contracción gradual indistintamente (será una u otra en función de cómo se coloque según el sentido del flujo) para poder realizar los cambios en tramos de diferentes presiones nominales mediante la técnica de termofusión.

La metodología se aplica a un ejemplo práctico para un esquema de diseño muy común en los sistemas fuentes por bombeo en nuestro país. Este procedimiento de diseño será de gran utilidad tanto en la etapa de anteproyecto, como en un proyecto de rehabilitación de sistemas fuente por bombeo, al proporcionar una herramienta para la determinación del diámetro económico en conductoras de PEAD, en aquellos proyectos que contemplen en su diseño una demanda fija (gasto constante) y un servicio continuo.

05 REFERENCIAS

- AseTub** (2010). "Informe Técnico: Soldadura térmica en tuberías de polietileno (PE)", Asociación Española de Fabricantes de Tubos y Accesorios Plásticos, Madrid, España. Extraído de: <http://www.masa.es/wp-content/uploads/2013/06/INFORME-DE-SOLDADURA-TUBERIA-DE-PE-ASETUB-MAYO-2010.pdf>. en septiembre de 2020
- Cabrera E.** (1996). "Ingeniería Hidráulica Aplicada a los Sistemas de Distribución de Agua", 2da Edición, Editorial Unidad Docente Mecánica de Fluidos, Universidad Politécnica de Valencia, t. 1 y 2, ISBN 978-848-94-8701-7, Valencia, España
- Featherstone R. E. and El-Jumaily K. K.** (1983). "Optimal Diameter Selection for Pipe Networks", Journal of Hydraulic Engineering, 109 (2): 221–234, February, ISSN 0733-9429, Virginia, United States of America
- Fuertes V. S., Pérez R., Martínez F. J. y López P. A.** (2007). "Optimización del sistema formado por la estación de bombeo, la tubería de impulsión y el depósito de regulación", Pimentel H., Pérez R. e Iglesias P. L. (2016). "Abastecimento de água: o estado da arte e técnicas avançadas", pp.: 261-274, Editorial Universidade Federal da Paraíba, ISBN 978-85-7745-078-3, Paraíba, Brasil
- Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH)** (2006). "Instructivo para la utilización de Tuberías y Accesorios de PEAD", 63 pp., La Habana, Cuba
- López-Cortijo I., Esquiroz J. C., Aliod R. y García S.** (2008). "Determinación de los costes energéticos en el cálculo de redes a presión con bombeo directo", Memorias del XXV Congreso Nacional de Regadíos, Conferencia 15, pp. 1-15, Navarra, España
- López A. S.** (2012). "Planeamiento de sistemas de abastecimiento de agua en comunidades de montaña de Venezuela", Tesis de doctorado, Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", Cujae, La Habana, Cuba
- Martínez F. J., López G., Iglesias P. L. y Fuertes V. S.** (2007). "Selección de la bomba para una impulsión mediante optimización económica", Memorias del VII Seminario Iberoamericano sobre Planificación, Proyecto y Operación de Sistemas de Abastecimiento de Agua (VII SEREA), ISBN: 84-89487-25-1, Michoacán, México

- Martínez Y.** (2011). "Metodología para el diseño hidráulico de las estaciones de bombeo para acueducto", Tesis de doctorado, Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", Cujae, La Habana, Cuba
- Pérez R.** (1993). "Dimensionado óptimo de redes de distribución de agua ramificadas considerando los elementos de regulación", Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España
- Pulido I, Gutiérrez J. C. and Asensio R.** (2006). "Optimal design of pumping stations of inland intensive fishfarms", *Aquacultural Engineering*, 35 (2006): 283-291, ISSN 0144-8609, Ámsterdam, Holanda
- Unión Eléctrica (UE)-Ministerio de Energía y Minas (Minem)** (2018). "Manual de Consumidores: Tarifas eléctricas y su utilización", 33 pp., La Habana, Cuba

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Yaset Martínez Valdés <https://orcid.org/0000-0001-9770-022X>

Participó en la elaboración de la metodología de cálculo para la obtención del diámetro económico en tuberías de impulsión.

Félix Riaño Valle <https://orcid.org/0000-0002-9342-6064>

Realizó contribuciones en el diseño de la investigación, análisis de los resultados y en la revisión y redacción del trabajo en su versión final.

Liz Acosta Caballero <https://orcid.org/0000-0002-7094-8257>

Trabajó en el procesamiento de los datos del caso de estudio, haciendo contribuciones en su análisis e interpretación. Participó en la búsqueda de información y en la redacción final del trabajo.

Diagnóstico del sistema de tratamiento de residuales de la empresa agroindustrial azucarera 30 de noviembre

Roxana Aymeé Luis Winograd

E-MAIL: roxluis87@gmail.com

Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae), Cuba.

Robier Hernández Barbosa

E-MAIL: robierh2021@gmail.com

Empresa mantenimiento de Occidente. Vía Blanca y Belot, Guanabacoa, La Habana.

Pablo Enrique Cárdenas Quiñones

E-MAIL: adrianmoralesluis2017@gmail.com

Empresa Agroindustrial azucarera "30 de Noviembre". Carretera al Central 30 de Noviembre, km 1 ½, Taco-Taco, San Cristóbal, Cuba.

RESUMEN

La sociedad y el medio ambiente deben mantener un equilibrio si se desea alcanzar el desarrollo sostenible, pero con el desarrollo de la sociedad, donde la industrialización que forma parte indisoluble del proceso, el equilibrio no siempre se mantiene, y generalmente ese desequilibrio tiene efectos negativos sobre el medio natural. La empresa agroindustrial azucarera (EAA) "30 de Noviembre", ubicada en el municipio San Cristóbal, provincia Artemisa, es considerada una de las entidades grandes contaminantes del municipio. Aplicando los diferentes métodos y técnicas de investigación, se caracterizaron los residuales de la entidad y se diagnosticó su sistema de tratamiento, arrojando como resultados que los residuales no cumplen con la NC: 27-2012, y el sistema de tratamiento no es funcional, por lo que se realizó un plan de medidas para el mejoramiento del sistema actual.

PALABRAS CLAVES:

residuales, sistema de tratamiento.

Diagnosis of de waste treatment system of the company 30 de Noviembre

ABSTRACT

The society and the environment must be in balance in order to achieve sustainable development, but with the development of the society, where industrialization, form an indissoluble part of the process, the equilibrium is not always maintains, and generally, the imbalance that is generated has negative effects on the natural environment. The Company agro-industrial sugar (EAA) "November 30", located in the municipality San Cristóbal, province Artemisa is considered one of the entities large contaminants in the municipality. In this work by applying different method and research techniques, we characterized the residual of the entity, with its system of treatment, shedding as results that the residuals do not comply with the NC: 27-2012, and the treatment system is not functional, so we made a plan of measures for the improvement of the current system.

KEYWORDS: residual, treatment system.

01 INTRODUCCIÓN

El agua es un elemento fundamental para el surgimiento de la vida en nuestro planeta, sin ella cualquier tipo de vida le fuera imposible alcanzar el desarrollo que hoy presentan. Constituye parte integrante de todos los tejidos animales y vegetales, siendo necesaria para el proceso de las funciones orgánicas, e indispensable para el uso de los seres humanos que proporcionan un mayor bienestar, tanto para la salud, la alimentación, como para la industria y el esparcimiento. Este preciado líquido se encuentra en la naturaleza en diversas formas constituyendo parte del ciclo hidrológico, los procesos que forman parte de este ciclo tienen sus funciones dentro del gran ecosistema. La sociedad y el medio ambiente deben estar en un equilibrio para poder alcanzar el desarrollo sostenible, pero con el desarrollo de la sociedad, donde la industrialización forma parte indisoluble del proceso, el equilibrio no siempre se mantiene, y generalmente ese desequilibrio que se genera tiene efectos negativos sobre el medio natural. Los principales problemas ambientales que se generan están dados por la contaminación del aire, el suelo y fundamentalmente el recurso agua.

Los gobiernos de algunos países, principalmente de los más desarrollados, se han dado a la tarea de investigar y llevar a cabo distintos tipos de tratamientos de agua para reducir los dañinos efectos que la contaminación ha ocasionado a este recurso.

La definición exacta de agua residual es compleja, ya que está en función de las características que se den en cada población o industria, dependiendo además del sistema de recogida que se emplee. A pesar de ello, se ha definido como aquella que procede del empleo de un agua natural o de la red en un uso determinado. Las aguas residuales, además de patógenos, contienen otras muchas sustancias contaminantes. Éstas pueden ser procedentes de zonas residenciales o similares, infiltraciones y aportaciones incontroladas, aguas pluviales o aguas de complejos hospitalarios e industriales (Osorio et al. 2009).

En la industria, las aguas residuales presentan una gran cantidad de contaminantes que tienen una acción muy compleja sobre el medio ambiente, afectando el desarrollo natural de los ecosistemas por el cambio de condiciones tales como la toxicidad, olor, color, entre otras. Estas aguas están siendo tradicionalmente tratadas por métodos convencionales, sin embargo, la efectividad de estos procesos se ve seriamente limitada en los últimos años, debido a la disminución de la disponibilidad de agua fresca y al aumento de la demanda tanto humana como industrial, lo cual significa mayores caudales de agua residual a tratar (Muñoz 2008). El tratamiento de estas aguas tiene por objetivo disminuir la cantidad de agentes contaminantes en las masas de agua dependiendo no sólo del tipo de contaminantes presentes en ellas, sino considerando el uso que se le dará nuevamente una vez que el agua haya cumplido con el tratamiento adecuado.

En la Empresa agroindustrial azucarera (EAA) “30 de Noviembre”, ubicada en el Consejo Popular Taco-Taco, municipio San Cristóbal, se han llevado a cabo varios estudios sobre el uso del agua, donde se analizó el consumo del agua como uno de los problemas que golpea seriamente a la industria azucarera durante las últimas zafras, influyendo de manera negativa en la producción de azúcar. Pero continúa sin solución la problemática de la ineficiencia del sistema de tratamiento de residuales de la industria. Lo que está provocando la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas de la zona.

El tema de la contaminación ambiental ha tomado en los últimos tiempos mayor fuerza, los gobiernos del mundo han unido fuerzas para decretar acciones referentes a la disminución de los agentes contaminantes y la protección de los recursos naturales, dentro de los cuales sobresale el

recurso agua por su inobjetable importancia. En Cuba son muchas las acciones encaminadas en la protección de este vital recurso y de su aprovechamiento óptimo. La EAA “30 de Noviembre” todos los años muestrea los residuales pero nunca ha realizado un diagnóstico sobre las causas que originan el no cumplimiento de la NC: 27-2012, por lo que este trabajo es de suma importancia, dado que su objetivo general es proponer acciones para el mejoramiento del sistema de tratamiento existente y con ello alcanzar que los residuales cumplan con las normativas de vertimiento de las aguas residuales.

02 REFERENTES TEORICOS

El agua es uno de los principales constituyentes de la materia viva y del medio en que vivimos. Sus propiedades físicas son notablemente diferentes a las de otras sustancias, de manera tal que determinan la naturaleza de los mundos biológicos y físicos. Se le puede encontrar en los tres estados: líquido, sólido y gaseoso, lo cual provoca que esté ampliamente distribuida en la naturaleza. En el estado líquido constituye los lagos, océanos y corrientes del mundo; cubriendo aproximadamente tres cuartos de la superficie terrestre, también en plantas, animales, rocas y minerales (Terry et al. 2010), (Despaigne 2016).

Muchas de sus propiedades físicas son anormales en comparación con las de otros líquidos y, como este es el único líquido extremadamente abundante en la naturaleza, es de gran importancia en todos los órdenes de la vida. A las temperaturas ordinarias, el agua es un líquido transparente e incoloro. El agua pura es también inodora e incapaz de enmascarar la presencia de la más mínima cantidad de impurezas. En comparación con otros líquidos, el agua tiene un punto de fusión de 0 °C y de ebullición 100 °C (Terry et al. 2010).

CLASIFICACIONES DE LAS AGUAS RESIDUALES

Las aguas residuales son aguas con impurezas procedentes de vertidos de diferentes orígenes, domésticos e industriales, principalmente. De esta forma, las aguas residuales pueden contener elementos contaminantes originados en desechos urbanos o industriales. Debido a esto, se pueden clasificar en: aguas municipales, aguas grises y aguas industriales

Las aguas residuales industriales son aquellas procedentes de cualquier actividad o negocio en cuyo proceso de producción, transformación o manipulación se utilice el agua. Son variables en cuanto a caudal y composición (Terry et al. 2010), (Hernández 2000). Ellas son más contaminadas que las aguas residuales urbanas, con una carga más difícil de eliminar. Sus vertimientos pueden encontrarse en determinadas horas del día o incluso únicamente en determinadas épocas del año, dependiendo del tipo de producción y del proceso industrial.

Su alta carga, unida a la enorme variabilidad que presentan, hace que los tratamientos de las aguas residuales industriales sean complicados, siendo preciso un estudio específico para cada caso, ya que presentan gran variedad y cantidad de productos, los cuales están en concordancia con la actividad que se realiza (alimentación, química, petroquímica, agrícola, forestal, minerales y metalúrgicas, etc.).

PARÁMETROS QUE MIDEN LA CALIDAD DE LAS AGUAS RESIDUALES

El índice de calidad de agua residual (ICAR) designa a un conjunto agregado o ponderado de parámetros (NOM-001-SERMARNAT 2021) o indicadores (Coacalla-Castillo et al. 2020), con el fin de ser utilizado como una herramienta útil para evaluar la afectación provocada por los diferentes contaminantes que acompañan al agua. Para determinar la calidad de las aguas residuales se deben

tener en cuenta sus parámetros, físicos, químicos y biológicos. Dentro de los parámetros físicos podemos encontrar la conductividad eléctrica o específica, color, pH, turbiedad, sólidos totales, sólidos sedimentables, temperatura y olor (Metcalf and Eddy, 1995). Mientras que dentro de los químicos se analizan la acidez, alcalinidad, demanda bioquímica de oxígeno (DBO5), demanda química de oxígeno (DQO), fósforo, grasas, nitrógenos, oxígenos disueltos, sulfuros y metano (Metcalf and Eddy 1995). Los ingenieros sanitarios y ambientales deben su conocimiento a las características biológicas de las aguas residuales, específicamente de los microorganismos que intervienen en los tratamientos biológicos, patógenos y los utilizados como indicadores de contaminación. Dentro de los que se encuentran bacterias, hongos, algas, virus, protozoos, organismos patógenos, helmenitos, coliflores totales y escherichia-coli (Cleseri 1999).

SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Las aguas residuales se presentan en dos componentes: líquido y sólido. Básicamente existen dos formas generales de tratar las aguas residuales. Una de ellas consiste en dejar que las aguas residuales se asienten en el fondo de los estanques, permitiendo que el material sólido se deposite en el fondo. Después se trata la corriente superior de residuos con sustancias químicas para reducir el número de contaminantes dañinos presentes. El segundo método, más común, consiste en utilizar la población bacteriana para degradar la materia orgánica. Este método es conocido como tratamiento de lodos activados y requiere el abastecimiento de oxígeno a los microbios de las aguas residuales para apoyar su metabolismo (Cabezas 2013).

El tratamiento de aguas residuales es necesario para prevenir la contaminación ambiental y del agua y, por ende, la protección de la salud de la población. En Latinoamérica cada región tiene sus propias características correspondientes a métodos y tipos de tratamientos particulares, así como cierto número de opciones tradicionales. La más común es la planta de tratamiento de aguas residuales (Cabezas 2013).

MARCO LEGISLATIVO

En Cuba existen disposiciones que regulan la conservación, protección, mejoramiento y transformación del medio ambiente, así como el uso racional de los recursos naturales, que son de diferentes tipos desde leyes hasta normas técnicas. La Norma Cubana NC 27:2012 ha sido elaborada por el Comité técnico de normalización NC/CTN 3 de gestión ambiental, integrado por representantes de varias entidades incluyendo al Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente.

La norma es un instrumento legal para garantizar la calidad de las aguas terrestres mediante la regulación de las descargas de residuales a ellas, lo que a su vez sirve de base para la elaboración de estrategias de saneamiento. Ella ayudará a la protección de las fuentes de abasto a la población, los cursos naturales de las aguas, las aguas subterráneas y las obras e instalaciones hidráulicas.

La norma sobre el vertimiento de aguas residuales es el elemento clave para la aplicación, por los organismos competentes, de multas e impuestos por contaminación de los cuerpos receptores y utilización o aprovechamiento de bienes del dominio público de la nación, como lo son las aguas terrestres, así como de los servicios comunales de alcantarillado y tratamiento de aguas residuales. Los aspectos relativos a las aguas residuales se evaluarán de acuerdo con lo regulado en la NC: 27: 2012.

03 MATERIALES Y METODOS

UBICACIÓN GEOGRÁFICA

La empresa agroindustrial azucarera “30 de Noviembre” se encuentra ubicada geográficamente en el poblado de la finca La Conchita, comunidad Taco-Taco, municipio San Cristóbal de la provincia Artemisa. Hacia el norte del ingenio a una distancia de 3 km está la autopista nacional Habana-Pinar, 2 km en dirección este del arroyo las Guásimas, de la comunidad de López Peña 3km al oeste de esta y a 15 km del litoral costero sur. En la figura 1, se observa la imagen satelital de la misma.



Figura 1. Imagen satelital de la empresa agroindustrial azucarera “30 de noviembre”.

PROCEDIMIENTOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUALES

Las corrientes de aguas residuales presentan gran variabilidad en su caudal y composición a lo largo de un día, una semana, un mes o una estación del año, haciendo difícil la obtención de la muestra de toda la corriente, en valor y calidad del agua, dado el alto costo de los análisis de laboratorio siendo este aspecto de gran importancia. Las condiciones diversas y sus diferentes objetivos, determinan la imposibilidad de establecer un procedimiento único y la aplicación universal para esta actividad por lo que los técnicos responsables de esta tarea deberán dominar los principios teóricos de la labor y desarrollar la habilidad práctica para garantizar los resultados calificables, por lo que el muestreo debe realizarse por un equipo automático con sensores de análisis de parámetros que determinen el cambio repentino de la muestra tomada (Cleseri 1999).

Tomas de muestras (Compuestas)

En la investigación fue necesaria la toma de muestras compuestas proporcionales al caudal con el objetivo de tener un muestreo lo más característico posible de los residuales generados por la entidad. Al combinar los volúmenes individuales la muestra final sería de 2-3 L. Su formulación sería la que se representa en la fórmula 1.

$$V_{muestra} = \frac{Q_t * V_{total}}{Q_m * n} \quad (1)$$

donde: $V_{muestra}$ es volumen de la muestra que se toma, Q_t es el caudal a la hora de tomar la muestra, V_{total} es el volumen final de la muestra compuesta, Q_m es caudal promedio durante el periodo de muestreo y n es el número de muestras simples tomadas.

Cálculo del caudal

Existen diferentes métodos para obtener los resultados del cálculo de un caudal determinado

(volumétrico, vertedores, de sección-velocidad, de pendiente-sección y trazadores de colorantes). Para la correcta selección del dispositivo de medición hay que tener en cuenta factores como el tipo de aplicación abierta o cerrada, los intervalos de caudal, características, los constituyentes del fluido, la presencia requerida, las pérdidas de carga, la necesidad de instalación y la facilidad de mantenimiento (Metcalf and Eddy 1995). El método volumétrico, consiste en la medición directa del caudal en un recipiente de volumen conocido cuyo tiempo de llenado se mide y se controla por la relación expresada en la fórmula 2.

$$Q = \frac{VI}{T} \quad (2)$$

donde: Q es el caudal (L/s), VI es volumen del recipiente (L) y T es el tiempo de llenado (s)

Determinación de la carga contaminante

La carga contaminante se determina por la fórmula 3.

$$Cr = C * Q \quad (3)$$

donde: Cr es la carga contaminante en término de DBO5, DQO, grasas, sólidos, etc. C es la concentración del parámetro que se evalúa y Q es el caudal de aguas residual

04 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

TOMA DE MUESTRA

Las muestras fueron recolectadas en un periodo de ocho horas seguidas, con un intervalo entre muestras de una hora, por lo que se utilizaron ocho muestras puntuales. Para realizar una muestra compuesta, los 300 mL finales fueron seleccionados teniendo en cuenta la relación con el caudal determinado en cada uno de los muestreos. En la tabla 1 se pueden observar los caudales determinados en cada una de las muestras y la porción utilizada para realizar la muestra compuesta.

Tabla 1. Relación del caudal con la porción seleccionada para la muestra compuesta
Fuente: Resultado de la investigación.

Muestras	Entrada al Sistema		Salida del Sistema.	
	Caudal (L/s)	Porción de selección(L)	Caudal (L/s)	Porción de selección
M-1	1,25	38	0,27	34
M-2	1,60	41	0,31	42
M-3	1,00	34	0,29	39
M-4	1,25	38	0,29	39
M-5	0,83	32	0,27	34
M-6	1,60	41	0,28	38
M-7	1,25	38	0,30	40
M-8	1,25	38	0,27	34
MEC1		300	MSC1	300

ANÁLISIS DE LABORATORIO

Una vez realizado el muestreo, las muestras fueron enviadas a los laboratorios de la Empresa Nacional de Análisis del Agua (ENAS), entidad rectora y calificada para determinar los parámetros establecidos en la NC: 27-2012, las cuales arrojaron como resultados los que se aprecian en la tabla 2.

Tabla 2. Muestras de análisis de residual de la entrada del sistema de tratamiento en la EAA
Fuente: Resultado de la investigación.

Parámetros V.I.:OD:0.80mg/l	L.M.A C.R. NC:27-2012	Salidas del Sistema 2020			Entradas al Sistema 2020		
pH (U)	6-9	4,76	5,01	3,83	3,98	3.9	3.7
C E (S/cm)	1500	2330	3475	3210	3060	2310	10 19
T(°C)	40	29,7	29,7	26	20,20	26	26.20
M F	--	--	--	--	--	--	--
DBO5 (Mg/L)	40	4540	1856	1446	1088	5848	4489
DQO(Mg/L)	90	7558	4128	3214	2418	9748	7482
SS (MI/L)	1	248	6,6	2,16	125	8.8	144
CT (NMP/100mL)	1000	1,6x10 ⁸	23x10 ³	23x10 ³	1,7x10 ³	1.7x10 ⁶	>1.7x10 ⁸
CTT NMP/100mL)	200	9,2x10 ⁷	7,8x10 ⁴	1,3x10 ³	4,9x10 ²	7.9x10 ⁵	1.6x10 ⁸
Pt (Mg/L)	5	5,00	2,88	6,48	11,5	70,8	136
O ² (Mg/L)	4	0	0	0	0	0	0
A y G (MG/L)	5	9,30	0,16	0	1,1x10 ⁻²	8,28	

ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS

En la figura 2 se muestra el residual del central en la zafra 2020-2021, el cual mantuvo valores de pH que oscilan entre 3,7 – 4,0 en la entrada del sistema y en la salida de 3,8 a 5,1, lo que indica que el pH es sumamente ácido y no cumple con la normativa, afectando el balance químico y ecológico del cuerpo receptor.



Figura 2. Comportamiento del pH en los análisis realizados al sistema de residuales de la EEA
Fuente: Resultado de la Investigación

Los valores altos de conductividad eléctrica de los residuales de la EAA como se muestran en la figura 3 oscilan entre 2330 – 3210 mS/cm en la salida del sistema y en la entrada están entre 1019 – 3060 mS/cm, esto ocurre debido al elevado contenido de sales disueltas.

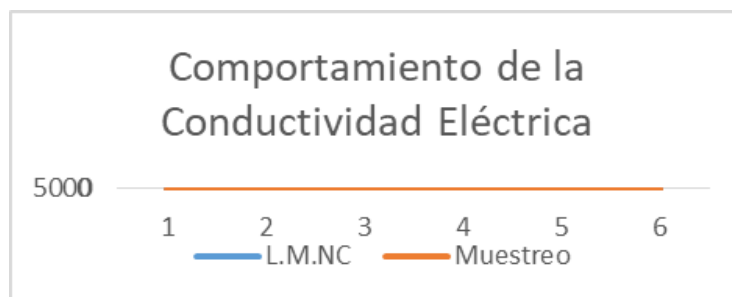


Figura 3. Comportamiento de la conductividad eléctrica en los análisis realizados al sistema de residuales de la EEA. Fuente: Resultado de la Investigación

La temperatura se encuentra dentro de los parámetros, y como en el momento de la toma de las muestras no se contaba con un termómetro, se trasladaron al laboratorio entrando en contacto con el aire acondicionado y se observó que mantiene los parámetros según las límites máximos admisibles en la entrada 20-26,20°C y en la salida del sistema 26-29,7°C, influyendo en los procesos químicos y biológicos de las aguas superficiales.

Las materias flotantes tampoco son un parámetro que se pueda hacer referencia como positivo, aunque los análisis de laboratorio indican que cumplen con la norma.

Es la figura 4 se puede observar el comportamiento de DBO₅, parámetro que no cumple con la normativa vigente, en la entrada con valores que oscilan entre los 1088-5848 mg/L y en la salida se presentan en un rango de 1446-4540 mg/L, lo cual prueba que los microorganismos no están proliferando, los valores altos de este parámetro provocan un decrecimiento del oxígeno disuelto en el agua.

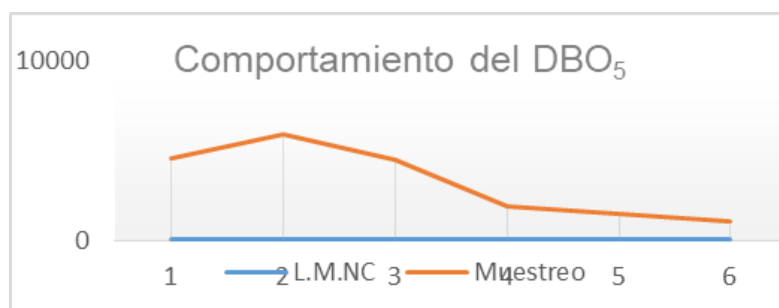


Figura 4. Comportamiento del DBO₅ en los análisis realizados al sistema de residuales de la EEA. Fuente: Resultado de la Investigación

La figura 5 muestra que los valores de DQO están muy por encima de la norma, promediando en la entrada con valores 2418-9488 mg/L y a la salida con 3214-7558 mg/L.



Figura 5. Comportamiento del DQO en los análisis realizados al sistema de residuales de la EEA. Fuente: Resultado de la Investigación.

El contenido de SS es de gran importancia y de igual forma los valores muestreados están muy por encima de la norma, como se muestra en la figura 6. Los valores que exceden los LMPP en la entrada del sistema son valores que varían entre 8,8-144 mL/L y en la salida del sistema entre los 2,16-248 mL/L.

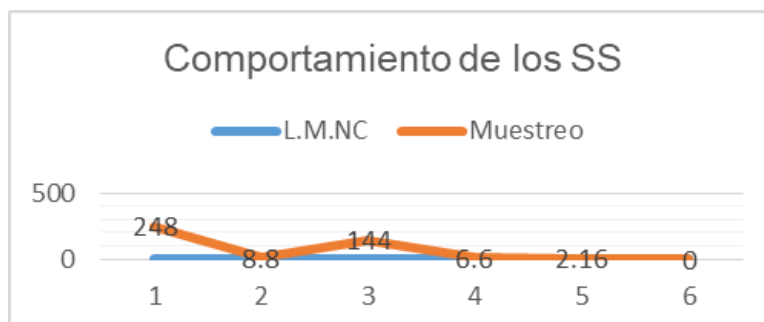


Figura 6. Comportamiento de los SS en análisis realizados al sistema de residuales de la EEA
Fuente: Resultado de la Investigación

Los valores de coliformes totales, se encuentran muy por encima de la normativa, aunque disminuyen gradualmente desde la entrada del sistema a la salida, en la figura 7 se puede observar el comportamiento de este parámetro.

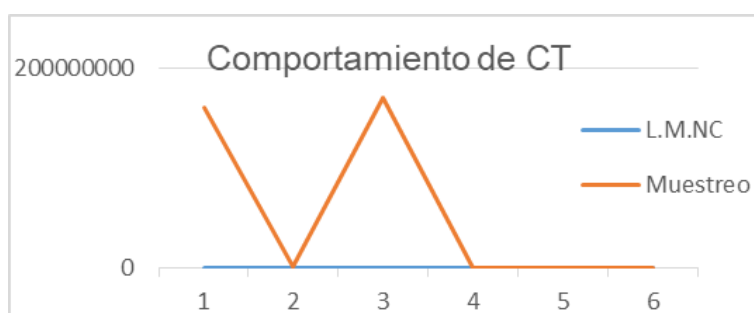


Figura 7. Comportamiento de los CT en los análisis realizados al sistema de residuales de la EEA
Fuente: Resultado de la Investigación

Los valores de CTT (figura 8), se encuentran muy por encima de lo establecido oscilando en un rango en la entrada del sistema de $7,9 \times 10^5$ a $1,6 \times 10^8$ NMP/100 mL y en la salida del sistema de $1,3 \times 10^3$ a $9,2 \times 10^7$ NMP/100mL.

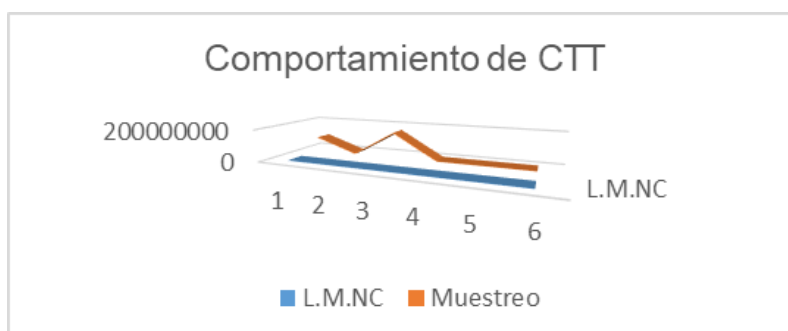


Figura 8. Comportamiento de los CTT en los análisis realizados al sistema de residuales de la EEA
Fuente: Resultado de la Investigación

En la figura 9 se observa el alto contenido de fosfato en las aguas residuales de la entrada con valores que oscilan entre los 13,6-11,5 mg/L y en la salida del sistema con valores están comprendidos entre 88-6,48 mg/L.

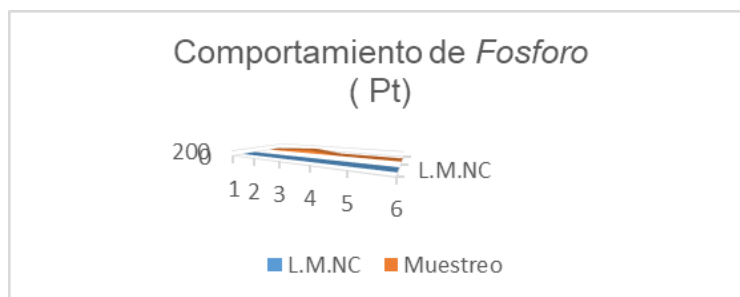


Figura 9. Comportamiento del Fosforo en los análisis realizados al sistema de residuales de la EEA
Fuente: Resultado de la Investigación

En la figura 10, se muestran los valores de O₂ muestreados en el sistema, los cuales tanto en la entrada como en la salida del sistema presentan valores de 0.

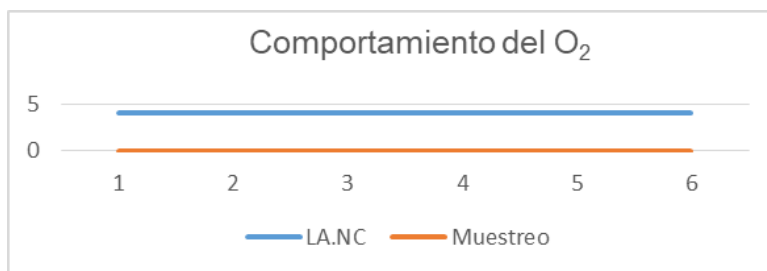


Figura 10. Comportamiento del O₂ en los análisis realizados al sistema de residuales de la EEA
Fuente: Resultado de la Investigación

Los aceites y las grasas son otros de los parámetros que se analizan según la norma, en la figura 11, se pueden observar sus valores, los cuales indican el mal funcionamiento de las diferentes trampas de grasas existentes en el sistema.

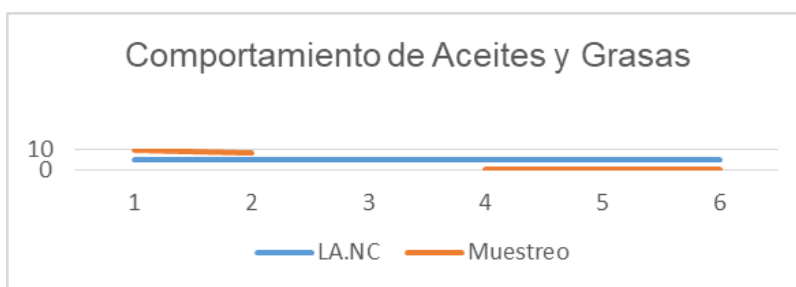


Figura 11. Comportamiento de los aceites y grasas en los análisis realizados al sistema de residuales de la EEA. Fuente: Resultado de la Investigación

DETERMINACIÓN DE LA CARGA CONTAMINANTE

Se realizó el cálculo de la carga contaminante arrojando valores muy altos de vertimiento de contaminante al efluente como se muestra en la tabla 3. Se aceptó que el vertimiento de los residuales sería en un turno de trabajo de 8 horas teniendo en cuenta las características de las últimas zafas, aunque es de destacar que hay días de producción continua de más de 8 horas lo que provoca un aumento significativo de este parámetro.

Tabla 3. Cálculo de la carga contaminante. Fuente: Resultado de la Investigación

Elemento	Parámetro a evaluar (C)	Caudal (Q) L/s	Carga contaminante (Cr)	Tiempo (h)	Carga Total
DBO ₅ (salida)	4 540	0,29	1316,6	8	10532,8
	1 856	0,29	538,24	8	4305,92
	1 446	0,29	419,34	8	3354,72

ESTADO ACTUAL DEL SISTEMA

El sistema preliminar de la EAA actual ha venido presentando disímiles situaciones negativas en sus procesos.

Sistema de alcantarillado de la fábrica: En el sistema de alcantarillado se observa un deterioro bastante avanzado como se muestra en la figura 12. En el tramo de la casa de caldera a la refinería, el mal estado del sistema provoca constantes desbordamiento de los residuales, lo cual trae consigo un aumento de la humedad, suciedad y mal olor. Este comportamiento también es similar en la zona de pesaje de la azúcar, centrífuga y en la casa de caldera.



Figura 12. Estado actual del sistema de alcantarillado de la EEA

Fuente: Resultado de la Investigación

Pre tratamiento: El sistema de pre tratamiento (constituido por trampas de grasas, registros y el sistema de canales y zanjias que trasladan el residual hasta las lagunas estabilizadoras) se encuentra en mal estado como se observa en la figura 13.



Figura 13. Estado actual del sistema de pre tratamiento de la EEA

Fuente: Resultado de la Investigación

Las trampas de grasas, debido a la falta de mantenimiento se encuentran obstruidas, por lo que estas no realizan ningún proceso de retención de los hidrocarburos, los cuales en muchas ocasiones son vertidos directamente al sistema. Los registros se encuentran obstruidos y muchos de ellos no funcionan porque están derrumbados, lo cual limita la circulación y la velocidad de los residuales. Las condiciones de las zanjas y los canales no son favorables tampoco, la capa impermeabilizante que evitaba la filtración del residual, debido a la falta de mantenimiento y al proceso erosivo ha ido perdiendo sus propiedades originales, por lo cual una parte del residual se infiltra directamente al manto, provocando afectaciones en los ecosistemas de la zona. Además, se evidencia la falta de mantenimiento a los canales, la presencia de materia flotante en grandes cantidades, lo cual provoca la solidificación de estos residuos en la superficie.

Destino final: El sistema de la EAA en su parte final está constituido por dos lagunas estabilizadoras, la primera es una laguna anaeróbica la cual recibe los residuales por el sistema de zanjas y canales. El paso de la laguna anaeróbica hacia la facultativa, está previsto por tres conductos, de los cuales solo funcionan dos y en muy mal estado constructivo, como se puede observar en la figura 14, las lagunas se encuentran con grandes problemas de funcionamiento.



Figura 14. Estado actual de las lagunas de estabilización de la EEA

Fuente: Resultado de la Investigación

En ambas lagunas se pueden observar problemas constructivos, los taludes no presentan los ángulos establecidos para poder tener la estabilidad necesaria, no se encuentran cercadas lo cual provoca que los animales puedan entrar a las zonas cercanas a estas. En la superficie de las lagunas se pueden observar láminas de hidrocarburos, además de gran cantidad de sólidos en suspensión. La coloración varía en diferentes zonas de las lagunas, estos cambios de coloración también son un indicio del mal funcionamiento de estas. Se aprecia el crecimiento de plantas dentro de las lagunas, esto influye negativamente en el proceso de estabilización de los residuales. Existe pérdida de la profundidad del sistema, debido a la gran acumulación de los residuos sólidos en ellas.

La salida del residual del sistema se realiza a través de un registro el cual se encuentra en muy mal estado constructivo, en el efluente se observa gran cantidad de sólidos en suspensión, el estado actual del sistema presenta una estrecha relación con los resultados del muestreo realizado.

PROPUESTAS DE ACCIONES DE MEJORAMIENTO

Debido a que las muestras tomadas no cumplen con las normativas y teniendo en cuenta el estado actual del sistema de tratamiento de residuales, se puede afirmar que el sistema de tratamiento de la EAA no funciona en su totalidad. Por lo que se propone un grupo de medidas (tabla 4) que ayudarán a disminuir la carga contaminante entre un 40 y el 60 %.

Tabla 4 Propuestas de acciones de mejoramiento. Fuente: Resultado de la Investigación

Acción	Objetivos	Responsables	Ejecutan	Fecha
Reconstrucción de los vertedores	Determinar el caudal generado en la entidad	Dirección de Calidad, Grupo técnico	ZETI	30 de marzo - 1 de octubre del 2022
Limpieza de los registros	Eliminar la vegetación, la acumulación de desechos sólidos	Técnico del Área de la Dirección de Calidad	Trabajadores de miscelánea	1-15 de diciembre del 2021
Mantenimiento de las trampas de grasas	Para un correcto funcionamiento	Jefes de Áreas	Trabajadores del Área y Miscelánea	29 de noviembre-15 de diciembre del 2021
Extracción de los sólidos arenosos, materia inerte y la orgánica en los desarenadores	Para un correcto funcionamiento	Técnico del Área de la Dirección de Calidad	Trabajadores de miscelánea	1-15 de diciembre del 2021
Ejecutar un programa de mantenimiento, higiene y seguridad de las lagunas estabilizadoras	Funcionamiento favorable de los cuerpos receptores y del medio ambiente a su entorno	Dirección de la EAA, de Calidad, de Mantenimiento	Especialistas de cada área	29 de noviembre-15 de diciembre del 2021

05 CONCLUSIONES

Se ratifica que la EAA “30 de Noviembre”, es una de las entidades contaminantes del territorio ya que los residuales que generan no cumplen con la NC: 27:2012, todos los parámetros analizados se encuentran fuera de los límites admisibles referidos en la normativa y vierte una carga contaminante muy superior a la norma establecida, por lo que se puede decir que el sistema de tratamiento de la entidad no es funcional y tiene que estar sujeto a un plan de mantenimiento para lograr la funcionalidad del mismo.

04 REFERENCIAS

Cabezas D. (2013). Diagnóstico del estado actual de la planta de tratamiento de aguas residuales ambiental, Universidad Autónoma de Ciencias básicas, Santiago de Cali.

- Coacalla-Castillo C. E., Pareja C. J. y Suarez O. A.** (2020) “Indicadores de gestión en el manejo integral de residuos sólidos de la municipalidad de Aymaraes”. *Revista Avances*. ISSN:1562-3297, Volumen 22, num 3. Cuba
- Despaigne P. R.L.** (2016). “Propuesta de rehabilitación de la planta de tratamiento de agua residual de la universidad Marta Abreu de las Villas”. Tesis de grado de ingeniería hidráulica, Universidad Central Marta Abreu de las Villas, Cuba.
- Hernández A.** (2000). *Manual de depuración Uralita*. España, Thompson Learning. ISBN 842-832-162-0.
- Metcalf and Eddy, INC** (1995). *Ingeniería de las aguas residual. Tratamiento, vertimiento y reutilización*, 3ª. Ed. Madrid. España. ISBN 84-481-1612-7
- Muñoz C. A.** (2008). *Caracterización y tratamiento de aguas residuales*. Tesis de grado en ingeniería industrial. Universidad autónoma del estado de Hidalgo, México.
- NOM-001-SEMARNAT-2021.** Límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. México.
- NORMA CUBANA NC: 27: 2012.** Vertimiento de aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado — especificaciones., 2da. edición, octubre
- Osorio Robles F., Torres Rojos J. C. y Sánchez Bas M.** (2009). *Tratamiento de aguas para la eliminación de microorganismos y agentes contaminantes. Aplicación de procesos industriales a la reutilización de aguas residuales*. Editorial Díaz de Santos, sf. 187pp. ISBN 978-847-978-903-9.
- Terry C., Gutierrez J. y Abo M.** (2010). *Manejo de las aguas residuales en la gestión ambiental*. Editorial CIGEA. 121pp. ISBN 978-959-287-023-9

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Roxana Aymeé Luis Winograd <https://orcid.org/0000-0002-4758-4045>

Realizó contribuciones en la interpretación de los datos. Participó en el diseño de la investigación, análisis de los resultados y en la revisión y redacción del informe final.

Robier Hernández Barbosa <https://orcid.org/0000-0002-85041-543X>

Trabajó en el procesamiento de los datos haciendo contribuciones en su análisis e interpretación. Participó en la búsqueda de información.

Pablo Enrique Cárdenas Quiñones <https://orcid.org/0000-0002-5032-5511>

Trabajó en el muestreo, determinación de parámetros de campo, haciendo contribuciones en su análisis e interpretación. Participó en la búsqueda de información.

Efectos del campo magnético en la dureza total, calor específico y punto de ebullición del agua

Nuria de los Ángeles Vaillant López

E-MAIL: nuriavl@civil.cujae.edu.cu

Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae), Cuba.

Gabriela Carreras Fernández

E-MAIL: gabycarrerasf.98@nauta.com

Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae), Cuba

Guillermo Ribeaux Kindelán

E-MAIL: ribeaux@uo.edu.cu

Centro de Electromagnetismo Aplicado (CNEA), Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba.

RESUMEN

Para examinar el efecto del tratamiento magnético (TM), en la dureza total (DT), punto de ebullición (PE) y capacidad de conservación de calor (CC) del agua de la fuente "Coscolluela", de La Habana, las muestras fueron sometidas a un campo magnético (CM) generado por imanes permanentes, marca NOVAMAG, para tres valores de intensidad de CM (325 mT, 268 mT y 217 mT), velocidad de circulación 0,073 m/s, tres tiempos de exposición (1.09 s, 2.18 s, 3.27 s) y temperatura ambiente ($22 \pm 1^\circ\text{C}$). Se obtuvieron variaciones en la DT, el PE y la CC de las muestras con TM. En cuanto a la memoria magnética, en los periodos de 48h y 72h se mantuvieron los efectos provocados por el CM para el PE y la CC, no así para DT.

PALABRAS CLAVES: conservación de calor, dureza total, memoria magnética, punto de ebullición, tratamiento magnético.

Effects of the magnetic field on the total hardness, specific heat and boiling point of water

ABSTRACT

To examine the effect of the magnetic treatment (MT), in the total hardness (TH), point of boil (PB) and capacity of conservation of heat (CC) of the water of the source "Coscolluela", of Havana, the samples were subjected to a magnetic field (MC) generated by permanent imams, NOVAMAG marks, for three values of intensity of MC (325 mT, 268 mT y 217 mT), speed of circulation of 0,073 m/s, three times of exhibition (1,09s, 2.18s, 3.27s) and ambient temperature ($22 \pm 1^\circ\text{C}$). Variations were obtained in the TH, the PB and the CC of the samples with MT. As for the magnetic memory, in the periods of 48h and 72h they stayed the effects caused by the MC for the Pb and the CC but didn't for the TH.

KEYWORDS: heat conservation, total hardness, magnetic memory, boiling point, magnetic treatment.

01 INTRODUCCIÓN

El creciente déficit y el continuo incremento de la demanda de agua en los últimos años, ha propiciado la búsqueda de nuevas y factibles tecnologías para el ahorro y reúso de las aguas. Teniendo en cuenta que la mayoría de los tratamientos para la potabilización se realizan con productos químicos no degradables, caros y cuyos lodos contaminan el medio ambiente, se hace impostergable el uso de tecnologías limpias y económicas, como el TM.

A pesar de los años transcurridos de las primeras instalaciones de acondicionadores magnéticos para reducir incrustaciones en tuberías y calderas, el tema no ha perdido actualidad, aunque muchas veces con ánimos comerciales, se le atribuyen al agua que ha sido tratada magnéticamente, propiedades mágicas, y abunda el uso de terminología pseudocientífica, que contribuye a que esta técnica sea tomada con escepticismo en la comunidad científica.

De forma general, no existen dudas de la efectividad del TM, pero si coexisten discrepancias en la explicación del fenómeno que se observa, existiendo incógnitas en la explicación teórica de la influencia del CM sobre las propiedades de los sistemas acuosos. Este asunto se complejiza si tiene en cuenta la influencia de parámetros externos como la temperatura, el material de las tuberías y el amplio rango posible de frecuencias, intensidad, tiempo de exposición y velocidad del fluido, entre otros.

Las teorías que explican el efecto de las aplicaciones magnéticas sobre los sistemas acuosos no han sido íntegramente esclarecidas por los investigadores que trabajan el tema. Muchos artículos describen diferentes tipos de mecanismos de acción del campo magnético, y varios de ellos, llegan a conclusiones que entran en conflicto entre sí. El estudio de la influencia del TM en las propiedades físico - químicas de las aguas cubanas, y específicamente La Habana, favorecerían el esclarecimiento de algunas de las teorías existentes y su posible aplicación en centros y localidades con aguas de características similares.

La provincia La Habana, cuenta con un potencial de recursos hídricos propios evaluados en 430 hm³, de los cuales 323 hm³ son aprovechables. El abasto de agua a la capital del país se efectúa a través de 68 fuentes, de las cuales 67 son subterráneas y sólo una superficial. De las 67 fuentes subterráneas, 55 son de agua potable, mientras que 12 son de agua salobre que sirven a la zona costera del Este de la ciudad (Lasa 2008).

Las oportunidades del TM dirigidas hacia la eficiencia energética, permiten favorecer la aparición de ahorro por la disminución en el consumo de combustible a partir de una menor demanda energética del agua para la generación de la misma cantidad de vapor. Desde el punto de vista práctico, esto favorece el empleo del TM como complemento de las tecnologías de tratamiento de agua, donde se conjugarían los efectos anti-incrustantes con la disminución de la temperatura de ebullición.

Estudiar el efecto que produce el CM sobre la temperatura de ebullición del agua para evaluar una posible reducción de la misma, implicaría el acercamiento entre las temperaturas inicial y final en el proceso de calentamiento del agua, repercutiendo directamente sobre la cantidad de calor y un consecuente ahorro de energía.

02 TRATAMIENTO MAGNÉTICO

TRATAMIENTO MAGNÉTICO

Los acondicionadores magnéticos se ubican en los sistemas de manera que el fluido circule a través del campo magnético, en el que interactúan las líneas de inducción magnética directamente con el fluido, según muestra la figura 1.

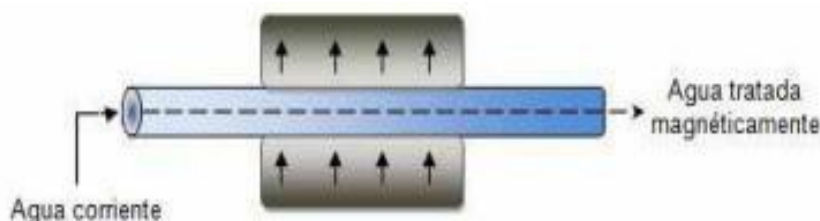


Figura 1. Tratamiento magnético del agua. Fuente: (Vaillant 2019)

Para garantizar un tratamiento eficiente deben cumplirse varios requerimientos, de los cuales, los más importantes son: lograr la perpendicularidad de líneas de inducción magnética $\vec{B}$ con respecto al movimiento del fluido y la permanencia o el tiempo de exposición del fluido al CM.

Los diferentes enfoques para la aplicación del tratamiento magnético tienen efectos significativamente diferentes en el rendimiento de cada sistema. El uso de imanes permanentes normalmente crea un campo magnético uniforme. Sin embargo, el campo se puede variar cambiando la orientación y disposición de los imanes. Diferentes formas (y geometría) de imanes permanentes también pueden exhibir diferentes valores de intensidad de campos magnéticos.

Cuando el agua circula por el campo magnético creado por los acondicionadores magnéticos, sobre los iones de las sales que están disueltos en el agua, inciden las líneas del campo magnético, surgiendo fuerzas que los mueven de su posición de equilibrio y, se dice, que el agua modifica algunas propiedades físico - químicas (Vaillant 2019).

A pesar del tiempo acontecido desde las primeras instalaciones de acondicionadores magnéticos en el mundo y en Cuba a través del Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado (CNEA), desde 1992, esta tecnología no ha perdido actualidad ya que sus aplicaciones han ido más allá de prevenir, retardar o eliminar la formación de depósitos o incrustaciones.

03 DISEÑO EXPERIMENTAL

SISTEMA EXPERIMENTAL

El sistema experimental del presente estudio estuvo conformado por una bomba peristáltica (Thermo Fisher Scientific, FH 100) para generar el flujo del fluido; una tubería de silicona de 2,85 m de longitud y 0,7 cm de diámetro interior, dos vasos de precipitado con capacidad de 1 000 mL cada uno y dos pares de imanes permanentes (acondicionadores magnéticos) con polos norte y sur, ubicados uno frete al otro para generar un campo magnético homogéneo. El tamaño de cada uno de los imanes es de 5 cm x 3 cm x 0,1 cm (largo, ancho y alto) y la separación entre cada par fue de 6,5 cm orientados en repulsión como se muestra en la figura 2.



Figura 2. Sistema experimental para el tratamiento magnético

Los acondicionadores magnéticos pertenecen a la marca NOVAMAG diseñados y construidos por el CNEA, son dispositivos constituidos a base de imanes de tierras raras, hechos de una aleación de neodimio (Nd₂), hierro (Fe₁₄) y boro (B), y fueron acreditados en los laboratorios de caracterizaciones magnéticas del CNEA.

Las muestras de agua fueron tomadas del grifo, abastecido por la fuente "Cosculluela", y analizadas en los laboratorios de calidad del agua de la empresa Aguas de La Habana. Se eligieron tres mediciones de parámetros para estudiar el efecto del TM al agua: dureza total, punto de ebullición y temperatura (capacidad de conservación del calor luego de haber alcanzado el punto de ebullición).

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para el estudio se tomaron cuatro muestras de 1 000 mL de agua, la primera sin TM (STM), las otras tres muestras fueron impulsadas por la bomba peristáltica con una velocidad de rotación constante de 35 rpm. Cada una de las muestras se analizó para un valor de intensidad de CM diferente según se muestra en la tabla 1 y los valores fueron medidos con un gaussímetro de efecto hall de la marca LakeShore (modelo 41).

Tabla 1. Parámetros de intensidad utilizados y su nomenclatura

Separación entre caras polares (cm)	Intensidad (mT)	Intensidad (Gauss)	Nomenclatura
1,2	325	3250	TMA
1,8	268	2678	TMB
2,5	217	2170	TMC

En las figuras 3, 4 y 5, se pueden observar los mapas de las escalas de valores de inducción de campo magnético en la zona de trabajo para las distancias de 1,2 cm, 1,8 cm y 2,5 cm respectivamente entre las caras polares, obtenidos mediante simulación haciendo uso del software profesional COMSOL Multiphysics 3.2.

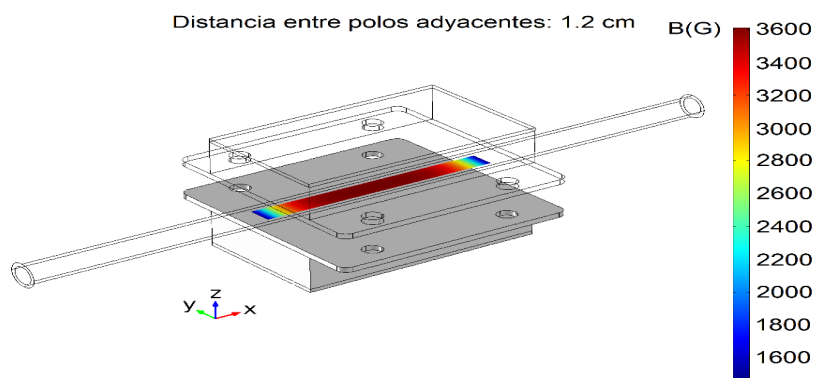


Figura 3. Mapa de escala de valores de inducción de CM para una distancia entre polos de 1,2 cm.

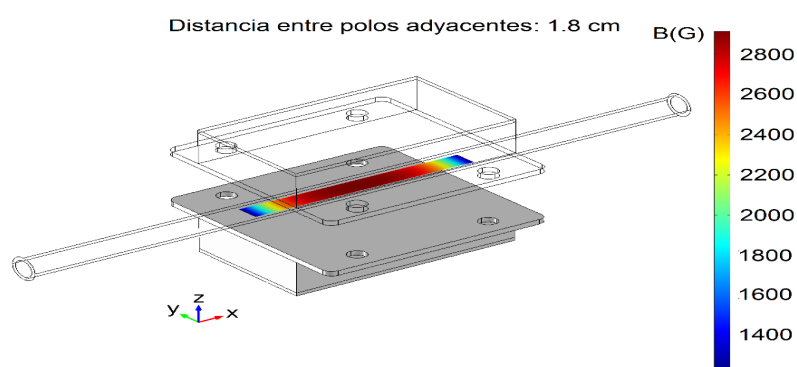


Figura 4. Mapa de escala de valores de inducción de CM para una distancia entre polos de 1,8 cm.

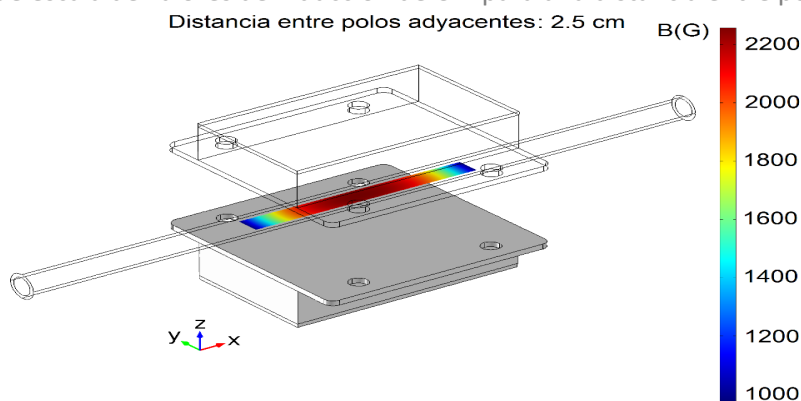


Figura 5. Mapa de escala de valores de inducción de CM para una distancia entre polos de 2,5 cm.

Cabe destacar que, independientemente de que la simulación del software es más precisa, los valores de intensidad de campo magnético medido manualmente con el gaussímetro y declarado en los experimentos, están dentro del rango de valores de inducción de CM en la zona de trabajo obtenidos por el software (ver tabla 2).

Tabla 2. Valores promedios de inducción de campo magnético medio, mínimo y máximo en la zona de trabajo.

Magnitud	Distancia entre los polos adyacentes (cm)		
	1,2	1,8	2,5
B_{medio} (G)	3267	2548	1923
B_{max} (G)	3633	2950	2293
B_{min} (G)	1444	1209	974
B_{std} (G)	521	455	362
B_{centro} (G)	3608	2914	2257

El fluido pasa por el sistema a una velocidad de circulación constante promedio de 0,073 m/s. Para cada valor de intensidad (325 mT, 268 mT y 217 mT) se analizó el comportamiento de la DT, PE y CC para tres tiempos de exposición al CM diferentes: (1,09s, 2,18s y 3,27s).

La temperatura de las muestras no fue controlada por lo que se mantuvo igual a la temperatura ambiente del medio (22 ± 1 °C). La investigación se llevó a cabo en tres etapas:

Primera etapa: análisis de DT, PE y CC de la muestra control.

Segunda etapa: aplicación del CM en los tiempos definidos, y medición de la DT, PE y CC.

Tercera etapa: estudio de la memoria magnética en las muestras con TM, a las 48 h y 72 h luego de su exposición al CM.

ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS

Se determina DT por el Método Volumétrico (APHA 1992), (NC ISO 6058, 2009) y (NC ISO 6059, 2010) de Calidad del Agua. Se utilizó una bureta automática (Duran Germany) de 25 mL con una precisión de $\pm 0,03$ mL, una pipeta aforada de bulbo central de 25 mL y un erlenmeyer de 250 mL (figura 6).



Figura 6. Diseño experimental para determinar dureza

Para la determinación del PE de las muestras se utilizó una plancha de inducción (IKA C-MAG HS 10), termómetro con rango de medición de 0 °C – 200 °C y con una precisión de ± 1 °C, un vaso de precipitado con capacidad de 100 mL y soporte universal (figura 7). La temperatura inicial de cada

una de las muestras fue igual a la temperatura ambiente del medio, aproximadamente de $22 \pm 1^\circ\text{C}$. La temperatura de la plancha se mantuvo constante para todos los análisis (350°C).



Figura 7. Diseño experimental para determinar punto de ebullición.

Para el análisis del comportamiento de la temperatura o CC de las muestras luego de haber alcanzado el punto de ebullición, se llevó a cabo un estudio de la variación de la temperatura en el tiempo, para ello se empleó un termómetro con rango de medición de $0^\circ\text{C} - 200^\circ\text{C}$, con una precisión de $\pm 1^\circ\text{C}$, y un cronómetro.

04 EFECTO DEL TRATAMIENTO MAGNÉTICO EN LA DUREZA, EL PUNTO DE EBULLICIÓN Y LA CAPACIDAD DE CONSERVACIÓN DE CALOR DEL AGUA

DUREZA DEL AGUA

La figura 8 muestra los resultados obtenidos durante la prueba de DT para todas las muestras analizadas. Se puede observar una disminución de la misma con el aumento de la intensidad del CM e independiente del tiempo de exposición para cada intensidad de CM (1,09 s, 2.,18 s, 3,27 s). Con las intensidades de CM (268 mT) y (325 mT) se mantienen idénticos valores de DT.

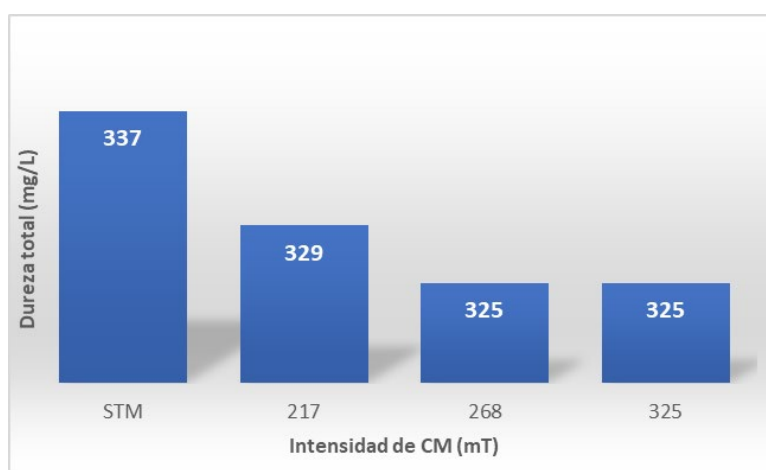


Figura 8. Comportamiento de la dureza total en las muestras analizadas.

Varios estudios han encontrado reducciones significativas en el grado de dureza del agua, aunque no de manera directa, sino que plantean la existencia de una disminución considerable en la concentración de CaCO_3 y un aumento en el grado de precipitación del mismo. Gehr et al. (1995)

confirman que existe una reducción de 9,8 % en la concentración de CaCO_3 en la fase acuosa de la muestra para una intensidad de campo magnético de 4,75 T, un tiempo de exposición al campo magnético de 2 min y una temperatura de 21 °C.

Vera (2018) presentó una reducción en 3,6% de los valores de DT del agua, después de ser expuesta a un CM de 120 mT y una velocidad de flujo de 40 L/min, también reporta una disminución en la dureza con el aumento del tiempo de exposición. Sin embargo, en este trabajo se obtiene una disminución aproximada de un 8,3 % de la DT, que se especula, puede deberse a las diferentes condiciones experimentales entre los dos estudios (intensidades de CM y tiempos de exposición)

PUNTO DE EBULLICIÓN

En la figura 9 se muestran los valores obtenidos durante el análisis de las diferentes muestras; como puede observarse existe una disminución aparente del punto de ebullición. La muestra sin tratamiento magnético (STM) lo alcanzó para una temperatura de 100 °C, mientras que las muestras con TM e intensidades de campo de (325 mT, 268 mT y 217 mT) lo alcanzaron a una temperatura de 99 °C, 98 °C y 98 °C respectivamente.

No se registró una influencia directa de los diferentes tiempos de exposición utilizados (1,09s, 2,18s y 3,27s) en la variación de los resultados obtenidos.

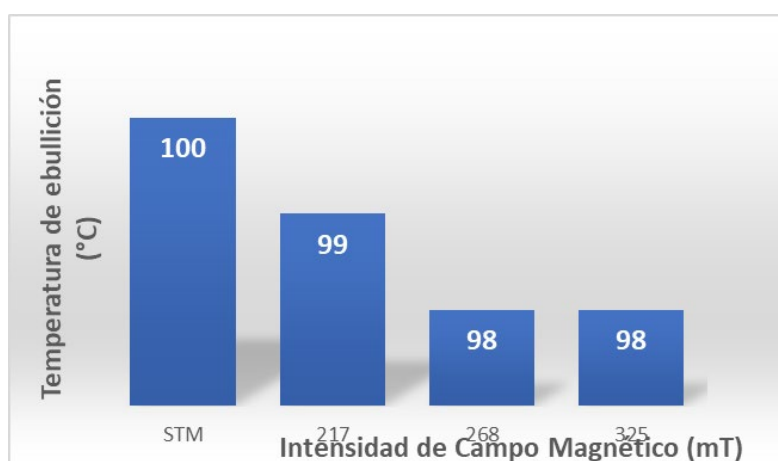


Figura 9. Punto de ebullición para las muestras analizadas.

Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Wang et al. (2018) que estudiaron el efecto del TM en el PE entre otras variables. Para ello, utilizaron imanes permanentes con cuatro tipos de intensidades de CM: 100 mT, 200 mT, 300 mT y 400 mT; obteniendo una disminución en el PE con el aumento de la intensidad, siendo 3 000G la intensidad de CM que obtuvo menor PE. Los autores obtienen un rango de diferencia de temperatura de 2,06 °C entre la muestra control y la muestra tratada con intensidad de CM 300 mT; mientras que, en el presente estudio, la diferencia de temperaturas entre ambos extremos es de 2 °C aproximadamente, teniendo en cuenta que el rango de precisión del termómetro empleado para realizar la medición es de ± 1 °C.

Acea (2005) plantea en su trabajo, que existe una tendencia general hacia la disminución de la temperatura de ebullición del agua empleada como consecuencia de la acción del CM, con una única excepción en el régimen de tratamiento correspondiente a la velocidad de 1,0 m/s y al campo generado por una corriente igual a 1,0 A, donde surge un ligero incremento. Resulta significativo el hecho de que las mayores reducciones de la temperatura de ebullición se obtienen para el menor valor de inducción magnética, siendo superior cuando la velocidad es de 1,0 m/s, donde la

temperatura de ebullición es 1,27 % menor que para la referencia.

CAPACIDAD DE CONSERVACIÓN DE CALOR DEL AGUA

Después de alcanzado el PE de cada una de las muestras, se analizó el comportamiento de la disminución de la temperatura en el tiempo, para ver si existía una influencia directa del CM en la capacidad de conservación de calor del agua.

En la figura 10 se pueden observar los resultados obtenidos durante esta prueba. Para las muestras con TM se alcanza el punto de ebullición entre los 98°C - 99°C; además, de manera general el comportamiento en cada caso es bastante similar, aunque se observa una mayor conservación de la temperatura en las muestras con TM.

Para las tres intensidades de CM involucradas, se conservó la temperatura entre 1°C - 2°C más que en la muestra control como promedio. Para 217 mT y 268 mT se observa en los primeros 25 minutos, una mayor estabilidad y diferencia de la CC contra la muestra control, existiendo una relación directa entre la intensidad del CM y la CC.

A partir de los 30 min se estabilizó el comportamiento de la temperatura en todas las muestras, alcanzando los 23 °C a los 90 min. No se encuentran dependencias de la CC con el tiempo de exposición.

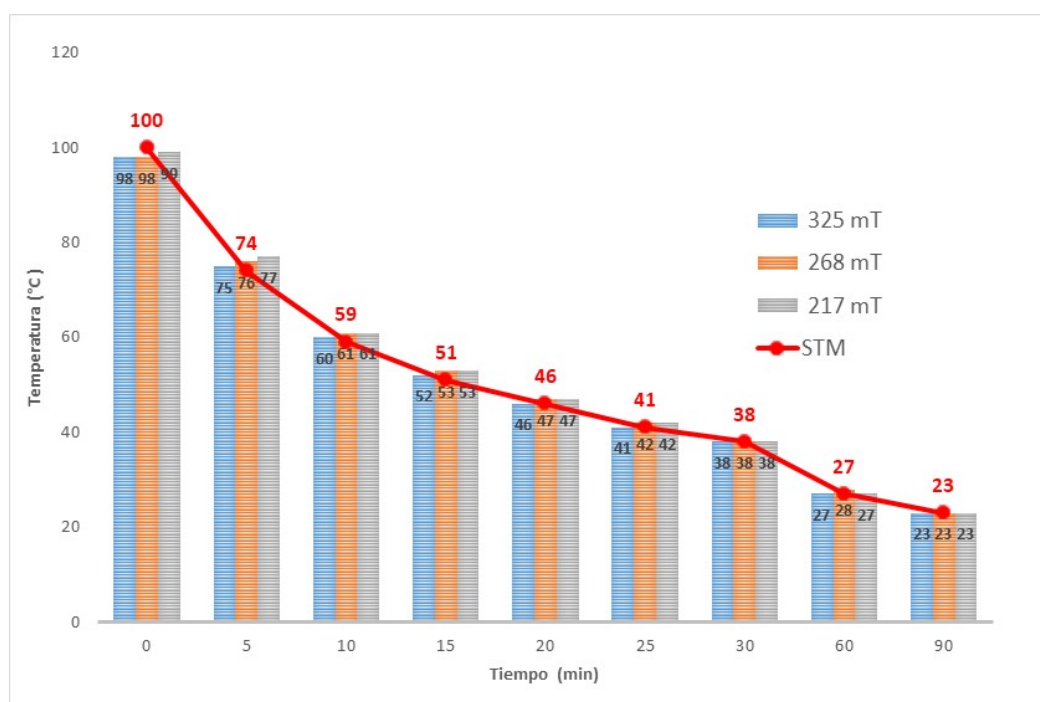


Figura 10. Punto de ebullición y conservación de calor

Este efecto registrado de la influencia del CM sobre la capacidad de conservación de calor del agua, al igual que el resultado obtenido en la disminución del PE, podría representar a escala industrial, en grandes volúmenes de agua, un significativo ahorro de energía.

Los resultados de Wang et al. (2018) confirman el obtenido en este estudio. Durante su investigación, plantearon que el comportamiento de las curvas de la temperatura de las muestras en el tiempo, se comportaron de manera similar. Informan el efecto del campo magnético en las propiedades físicas parciales del agua, con el agua del grifo y 4 tipos de agua magnetizada que se

midieron en la misma condición. Ellos encontraron que varias propiedades del agua cambiaron después del tratamiento magnético: el aumento del calor de evaporación, la disminución del calor específico y el punto de ebullición. Resumen además que los cambios dependen del efecto de la magnetización.

Zhou et al. (2000), presentaron los resultados de una simulación de Monte Carlo del agua líquida para estudiar la influencia de un CM externo sobre la energía interna y la capacidad calorífica del agua pura. Analizaron la estructura del agua calculando la función de distribución radial $g(r)$ de las moléculas de agua. Encontraron una función multipico del efecto magnético versus la inducción magnética ($B \rightarrow$). Mostraron un cambio significativo en la energía interna y la capacidad calorífica a $B \sim 0,2$ T. Con el aumento de B , el segundo pico de $g(r)$ aumentó marcadamente. Los cálculos los hicieron para sistemas de 64 y de 125 moléculas. Reportaron que los campos magnéticos del orden de 0,2 T aumentan el número de moléculas de agua monoméricas, pero también la tetraedralidad.

MEMORIA MAGNÉTICA

Varios estudios confirman la existencia de la memoria magnética de hasta 200 h en algunas propiedades del agua que han sido modificadas después de la exposición del fluido a un CM. (Coe y Cass 2000) (Coe y Cass 2012).

Los resultados obtenidos pasadas las 48 h y las 72 h de la exposición al CM de las muestras, se pueden observar a continuación para los diferentes parámetros estudiados.

DUREZA TOTAL

En el caso de la DT, para las condiciones experimentales de este estudio, los valores de las muestras con TM volvieron al valor control. Es decir, para las 48h y 72h, las muestras retomaron su valor inicial. Se concluye que no existe influencia de memoria magnética para esta propiedad.

PUNTO DE EBULLICIÓN

Los valores de temperatura con que las diferentes muestras con TM alcanzan el punto de ebullición permanecen iguales a los presentados en la figura 9. A las 48 h y 72 h, esta propiedad mantiene los cambios provocados por el efecto del CM, sin otras variaciones notables por la precisión del instrumento de medición empleado durante el análisis. Lo que deduce la existencia de memoria magnética en las condiciones experimentales estudiadas para esta propiedad.

CONSERVACIÓN DE CALOR

El comportamiento de la variación de la temperatura en el tiempo es similar al obtenido en la figura 10. Como se muestra, durante los primeros 25 min para las intensidades (268 mT y 217 mT) se conservó el calor 2°C más que en la muestra sin TM, mientras que para 325 mT solo se conservó 1°C más que en la muestra sin TM, por lo que se observa en este parámetro la influencia de la memoria magnética.

Estos resultados relacionados con la memoria magnética, son resguardados por lo planteado por Coey (2012), que agrega que el CM no solo influye en la estructura y morfología del CaCO_3 sino también que el agua podría adquirir una impresión magnética de larga duración (memoria). Aunque reconoce que los efectos de la memoria en el agua tienen una historia infeliz, su artículo se basa en la evidencia de un mecanismo de nucleación no clásico para el CaCO_3 y se recopilan trabajos en los cuales se pone en duda la teoría clásica de nucleación, sugiriendo una teoría en la que las soluciones

de CaCO_3 (no saturadas) contienen racimos o grupos pre-nucleados termodinámica-estables llamados DOLLOPs (Dynamically-Ordered Liquid-Like Oxyanion Polymers). Estos DOLLOPs, serían los que, cuando están sujetas a un CM alteran su composición y se deforman, favoreciendo un cierto tipo de estructura de racimo, y estos son los que permiten tener una gran memoria magnética en la solución.

05 CONCLUSIONES

Para el caso de la DT del agua analizada se obtuvieron diferencias significativas entre las muestras con TM y el control (STM) a las 0 h; observándose una aparente disminución de los valores de dureza por efecto del CM, que se corresponde con los límites cuantitativos establecidos por otras investigaciones. No siendo así a las 48 h y 72 h, pues los valores de DT del agua con TM retornan al valor inicial (STM).

En el caso del PE y la CC, para las muestras con TM se alcanza la ebullición entre los 98°C - 99°C y se observa una mayor conservación de la temperatura en las muestras con TM durante los primeros 25 min. Para 325 mT se conservó la temperatura 1°C más que en la muestra control, mientras que para 268 mT y 217 mT se conservó 2°C más que en la muestra control, existiendo una relación directa entre la intensidad del CM y la capacidad de conservación de calor. A partir de los 30 min se estabilizó el comportamiento de la temperatura en todas las muestras, alcanzando los 23°C a los 90 min.

El efecto de la memoria magnética estudiado bajo las condiciones establecidas en el presente estudio, no fue visible en todos los parámetros analizados, pues no se registraron resultados positivos de esta en la DT a las 48 h y 72 h. Sin embargo, propiedades como el PE y la CC si registraron patrones de comportamiento muy similares a los medidos después de hacer pasar las muestras por el CM.

El resultado obtenido en PE, al relacionarlo con los obtenidos en la DT, revela la necesidad de un ajuste en el régimen de TM, para lograr que ambos efectos se manifiesten simultáneamente, y provocar un verdadero ahorro por el incremento de la eficiencia energética, a partir de las variaciones que tienen lugar en el agua por la acción del CM.

De manera general los resultados obtenidos en esta investigación resultan de gran interés, pues la aplicación del TM en las diferentes entidades que son abastecidas por "Coscuelluela", y de manera general; en aguas de características similares, representaría un ahorro considerable para la economía nacional. El TM además de ser una tecnología limpia y eficiente puede ser producida a nivel nacional, lo que hace más económica y rentable su aplicación.

06 REFERENCIAS

- Acea C.M.** (2005). "Efecto del tratamiento magnético sobre la temperatura de ebullición", Revista Ingeniería Energética, Vol. XXVI, No. 1, pp 3-5. E-ISSN: 1815-5901.
- APHA** (1992). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 18th Edition, American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) and Water Pollution Control Federation (WPCF), Washington DC. USA.
- Coey J.M.D. and Cass, S.** (2000). "Magnetic Water Treatment". Journal of Magnetism and Magnetic materials. 209 (1-3): pp. 71-74. ISSN 0304-8853, [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(99\)00648-4](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(99)00648-4).
- Coey J.M.D.** (2012). "Magnetic water treatment – how might it work?" Philosophical Magazine Vol. 92, No. 31, (1) pp 3857–3865 <http://dx.doi.org/10.1080/14786435.2012.685968>.

- Gehr R., Zhai Z.A., Finch J.A. and Ram S.** (1995). "Reduction of soluble mineral concentration in CaSO_4 , saturated water using a magnetic field". Pergamon, Wat. Res. Vol. 29 (3), pp 933 – 940. DOI: 10.1016/0043-1354(94)00214-r.
- Lasa V.** (2008). "La experiencia en La Habana". INRH. En EXPOZARAGOZA, Agua y ciudad. <https://www.zaragoza.es>.
- NC ISO 6058:2009** (2009). "Calidad Del Agua — Determinación Del Contenido De Calcio — Método Por Valoración Con EDTA". La Habana, Cuba.
- NC ISO 6059:2010** (2010). "Calidad Del Agua — Determinación De La Suma De Calcio Y Magnesio — Método Por Valoración Con EDTA". La Habana, Cuba.
- Vera R.** (2018). "Evaluación de tres tipos de tuberías usadas en tratamientos magnéticos para la reducción de concentraciones de calcio y magnesio en aguas duras" (Tesis de pregrado). Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López, Calceta. Ecuador.
- Vaillant N.** (2019). "Agua, dureza y magnetismo", 54 pp., Cuba, La Habana, Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), Universidad Tecnológica de la Habana José Antonio Echeverría, CUJAE, (monografía), ISBN: 978-959-261-601-1.
- Wang Y., Wei H. and Li Z.** (2018). "Effect of magnetic field on the physical properties of water" in Results in Physics, Vol. 8. pp. 262-267. ISSN 2211-3797 <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2017.12.022>: www.journals.elsevier.com/results-in-physics.
- Zhou K., Lu G., Zhou Q.C., Song J.H., Jiang S.T. and Xia H.** (2000). "Monte Carlo simulation of liquid water in a magnetic field", Journal of Applied Physics, Vol. 88, pp. 1802-1805. DOI:10.1063/1.1305324.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Nuria Vaillant López <https://orcid.org/0000-0001-7362-084X>

Participó en la búsqueda y organización de la información, el diseño experimental, procesamiento y análisis de resultados, y la redacción y revisión del trabajo.

Gabriela Carreras Fernández <https://orcid.org/0000-0002-3296-3536>

Participó en la búsqueda de información, los análisis experimentales y su procesamiento y redacción.

Guillermo Ribeaux Kindelán <https://orcid.org/0000-0002-3296-3536>

Participó en la elaboración del diseño experimental, el análisis de resultados, el cálculo de los parámetros de intensidad de campo magnético utilizados y su nomenclatura, y la revisión del documento final