

ENFOQUE

UTE
REVISTA



Facultad Ciencias de la Ingeniería e Industrias
eISSN:13906542



Volumen 12 • N°3 • Julio 2021

Sumario

EFFECTO DE LA APLICACIÓN DE VAPOR SATURADO COMO SISTEMA DE ESTERILIZACIÓN ORGÁNICA (OSS) EN EL AJÍ MIRASOL (<i>CAPSICUM BACCATUM</i> VAR. <i>PENDULUM</i>) Y EN EL AJÍ PANCA (<i>CAPSICUM CHINENSE</i> JACQ.) [Effects of applying saturated steam as an Organic Sterilization System (OSS) in mirasol chili pepper (<i>Capsicum baccatum</i> var. <i>pendulum</i>) and panca chili pepper (<i>Capsicum chinense</i> Jacq.)] <i>Américo Guevara Pérez, Elizabeth Villanueva-Quejia, Diana Nolzco Cama, Gabriela Llontop, Keidy Cancino Chávez</i>	1
COMPARACIÓN DE MÉTODOS SENSORIALES DESCRIPTIVOS: PERFIL FLASH Y PREGUNTAS CATA PARA CARACTERIZAR INFUSIONES DE MUÑA (<i>MINTHSTACHYS MOLLIS</i>) (Comparison of descriptive sensory methods: flash profile and CATA questions to characterize muña infusions (<i>Minthostachys mollis</i>)) <i>Reynaldo J. Silva Paz, Gabriela N. Pichiua Gonzales, Amparo Eccoña Sota</i>	11
EMULSIONES GELIFICADAS ENRIQUECIDAS CON HARINA DE GARBANZO COMO POTENCIAL SUSTITUTO DE GRASA ANIMAL (Gelled emulsions enriched with chickpea flour as a potential substitute for animal fat) <i>Melisa, G. Britez, Fabiana A. Rolhaiser, Carina L. Fernández, Ricardo A. Fogar, Mara, C. Romero...</i>	24
DIMENSIONAL ANALYSIS APPLIED TO JACKETED SHELL AND TUBE HEAT EXCHANGERS MODELING (Análisis dimensional aplicado a la modelación de intercambiadores de calor de tubos y coraza enchaquetados) <i>Andres A. Sánchez-Escalona, Yanán Camaraza-Medina, Yoalbys Retirado-Mediaceja, Ever Góngora-Leyva, Manuel Vega-Almaguer</i>	36
EVALUACIÓN DE DISTINTAS FÓRMULAS EMPÍRICAS PARA EL CÁLCULO DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN EN LA CUENCA URBANA DEL RÍO BÉLICO Y CUBANICAY, CIUDAD DE SANTA CLARA (Evaluation of different empirical formulas for calculating the concentration time in the urban basin of the Belico and Cubanicy rivers, city of Santa Clara) <i>Carlos Lázaro Castillo García, Diego Emilio Abreu Franco, Michael Álvarez González</i>	51
REMOCIÓN DE METALES PESADOS (Cr^{+6} , Ni, Zn) DE LIXIVIADOS DEL RELLENO SANITARIO DE LA CIUDAD DE VERACRUZ, MÉXICO CON BARRERAS REACTIVAS PERMEABLES DE ARENA SÍLICA (Removal of Heavy Metals (Cr^{+6} , Ni, Zn) from Leachates of the Sanitary Landfill of the City of Veracruz, Mexico with Reactive Permeable Silica Sand Barriers) <i>Manuel Alberto Susunaga Miranda, Bertha María Estévez Garrido, Benigno Ortiz Muñiz, Rodrigo Manuel Susunaga Estévez</i>	65

Efecto de la aplicación de vapor saturado como Sistema de Esterilización Orgánica (OSS) en el ají mirasol (*Capsicum baccatum* var. *pendulum*) y en el ají panca (*Capsicum chinense* Jacq.)

[Effects of applying saturated steam as an Organic Sterilization System (OSS) in mirasol chili pepper (Capsicum baccatum var. pendulum) and panca chili pepper (Capsicum chinense Jacq.)]

Américo Guevara Pérez¹, Elizabeth Villanueva-Quejía², Diana Nolzco Cama³, Gabriela Llontop⁴, Keidy Cancino Chávez⁵

Resumen

Se determinó la influencia del peso, temperatura y tiempo de inyección de vapor saturado en el Sistema de Esterilización Orgánica (OSS por sus siglas en inglés) sobre la carga microbiana, análisis proximal y contenido de capsaicina en el ají mirasol y el ají panca. Se trabajó con 3 y 4 kg de ají, 100 y 105 °C (20 y 25 kPa), por 2 y 3 min. Los análisis pre y pos-OSS fueron los siguientes: recuento de aerobios mesófilos viables, coliformes totales, *E. Coli*, *Salmonella*, mohos y levaduras, proximal y contenido de capsaicina. Las muestras de 3 kg del ají mirasol, sometidas a 105 °C por 3 min, y las de 3 y 4 kg del ají panca, sometidas a 105 °C por 3 min, lograron mayor reducción de aerobios mesófilos y mohos. En la evaluación estadística se encontraron interacciones entre las variables peso y temperatura en ají mirasol; entre peso, temperatura y tiempo en el ají panca, sobre la reducción de aerobios mesófilos y mohos; esto influye en la composición proximal y reducción del contenido de capsaicina de 863.2 a 751.9 ppm (ají mirasol) y 405.6 a 315.1 ppm (ají panca); evidenciando que el tratamiento OSS es un método eficiente en procesos de descontaminación microbiana.

Palabras clave

Capsaicina, descontaminación microbiana, mirasol, panca.

Abstract

It was determined the influence of weight, temperature and time of injection of saturated steam as an organic sterilization system (OSS), on the microbial load, proximal analysis and capsaicin content in mirasol chili pepper and panca chili pepper. Work was done with 3 and 4 kg of chili pepper, 100 and 105 °C (20 and 25 kPa), for 2 and 3 minutes. The pre and post analyzes were: count of viable mesophilic aerobes, total coliforms, *E. coli*, *Salmonella*, molds and yeasts, proximal and capsaicin content. The samples containing 3 kg of mirasol chili pepper, subjected to 105 °C for 3 minutes and the ones containing 3 and 4 kg of panca chili pepper to 105 °C for 3 minutes, achieved a greater reduction of mesophilic aerobes and molds. The statistical evaluation found interactions between the variables: weight and temperature in mirasol chili pepper; weight, temperature and time in panca chili pepper, on the reduction of mesophilic aerobes and molds; influencing the proximal composition and content reduction of capsaicin from 863.2 to 751.9 ppm (mirasol chili pepper) and 405.6 to 315.1 ppm (panca chili pepper); showing that the OSS treatment is an efficient method in microbial decontamination process.

Keywords

Capsaicin, microbial decontamination, mirasol, panca.

- 1 Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú. [aguevara@lamolina.edu.pe, <https://orcid.org/0000-0002-2767-2726>]
- 2 Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú. [evillanueva@lamolina.edu.pe, <https://orcid.org/0000-0002-9609-5379>]
- 3 Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú. [dnolzco@lamolina.edu.pe, <https://orcid.org/0000-0002-8192-7611>]
- 4 Peruvian Nature. Lima, Perú. [gllontop@peruviannature.com, <https://orcid.org/0000-0002-2117-3985>]
- 5 Universidad San Ignacio de Loyola. Lima, Perú. [kcancino@usil.edu.pe, <https://orcid.org/0000-0003-1953-534X>]

1. Introducción

El género *Capsicum*, incluidos los géneros de sabor dulce y picante, es cultivado y utilizado en todo el mundo desde la antigüedad (Carrizo et al., 2016; Bortolin et al., 2016). De las 35 especies cultivadas, las de mayor valor económico son *C. annuum*, *C. baccatum*, *C. chinense*, *C. frutescens* y *C. pubescens* (Carrizo et al., 2016; Rodríguez, 2016). Estas especies han adquirido importancia hoy en día por su contenido en compuestos fenólicos, flavonoides y capsaicinoides con actividad antioxidante (Villar, 2019); este último otorga características de pungencia con diferentes propiedades y aplicaciones en farmacéutica, agronomía e industria veterinaria (Guillen et al., 2018). A pesar de que existen varios estudios respecto al contenido de capsaicinoides, aún hay poca información sobre la estabilidad de estos compuestos y consecuencias en su valor nutricional.

El ají mirasol (*Capsicum baccatum* var. *pendulum*), conocido como ají amarillo seco, ha adquirido gran importancia económica por su comercialización en fresco o en seco, o como fuente de colorantes naturales con los cuales se elaboran pinturas y cosméticos (Rojas et al., 2016; Gutiérrez-Rosati & Vega, 2016). De la misma forma, el ají panca (*Capsicum chinense* Jacq.), denominado ají seco peruano, se cultiva en la costa del Perú y es el condimento ideal para la gastronomía (Plaza & Lock de Ugaz, 1997) y uno de los productos de mayor consumo que se ha expandido a la industria cosmética y farmacéutica (Salazar, 2016). Asimismo, se utiliza como ingrediente funcional en la formulación de alimentos (Kantar et al., 2016), lo que representa una alternativa para reemplazar a los saborizantes y colorantes que existen en el mercado. Debido a su relevancia, Rojas et al. (2016) determinaron la composición proximal, características morfológicas y perfil sensorial del ají mirasol y del ají panca de la región Ica-Perú.

En los últimos años, con el fin de cumplir con la ley de inocuidad de los alimentos y con los parámetros microbiológicos que las reglamentaciones nacionales e internacionales exigen para el consumo de estos productos, se ha investigado la aplicación de métodos de esterilización como irradiación, microondas, radiofrecuencia, radiación UV e inyección de vapor sobre especias y condimentos (Guevara et al., 2016, 2017; Molnár et al., 2018; Gabriel et al., 2020a), y se ha concluido que la inyección de vapor es el método más eficiente en la reducción microbiológica y para la conservación de carotenoides, tocoferoles, Vitamina C y características sensoriales (Molnár et al., 2018).

La inyección de vapor, como (OSS), consiste en someter el producto a cambios de temperatura por un tiempo determinado dentro de una cámara de vacío (Guevara et al., 2016, 2017). Es fundamental determinar los parámetros adecuados con la finalidad de reducir la carga microbiana para obtener productos seguros y saludables. Por lo expuesto, se llevó a cabo la investigación planteando como objetivo determinar la interacción del peso de las muestras, temperatura y tiempo de inyección de vapor saturado del OSS sobre la carga microbiana, contenido de capsaicina y composición proximal en el ají mirasol y el ají panca deshidratados.

2. Metodología

2.1 Materia prima y acondicionamiento

El ají mirasol y el ají panca deshidratados (humedad promedio 15 %) fueron adquiridos en el Gran Mercado Mayorista de Lima (Perú). Se seleccionó a aquellos que no presentaron signos

de deterioro; luego fueron cortados, de forma manual, aproximadamente a 1 cm de longitud, y sometidos a análisis proximal y microbiológico (pre-OSS).

2.2 Sistema de esterilización orgánica (OSS)

Se realizaron los siguientes tratamientos para ambos ajíes:

1. Preparación: a) se pesó en la balanza (OHAUS, USA) 4 y 3 kg de ají y se colocaron en sacos de yute; b) se cargó a la cámara de vacío del equipo Multifuncional Chinese Medicine Sterilizer (SAINTY, China), y c) se evacuó el aire de la cámara de vacío.
2. Aplicación del tratamiento: se inyectó vapor saturado por 2 y 3 min manteniendo temperaturas de 100 y 105 °C, correspondiente a presiones de 20 y 25 kPa (Tabla 1).
3. Se descargaron las muestras.
4. Se deshidrató a 60 °C en un deshidratador de bandejas (Vulcanotec, Perú) hasta alcanzar una humedad promedio entre 4 y 5 %.
5. Se envasó en bolsas de polietileno de alta densidad como envase primario y en cajas de cartón como envase secundario.
6. Se almacenó el producto obtenido a temperatura ambiente (pos-OSS).

Tabla 1. Diseño experimental aplicado para ají mirasol y ají panca

Tratamiento	Peso (Kg/saco)	Temperatura (°C)/ Presión (Kpa)	Tiempo de proceso (min)
T1	4	100 (20)	3
T2	4	105 (25)	3
T3	4	100 (20)	2
T4	4	105 (25)	2
T5	3	100 (20)	3
T6	3	105 (25)	3
T7	3	100 (20)	2
T8	3	105 (25)	2

2.3 Métodos de análisis

A. ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO

Todas las muestras en pre y pos-OSS se analizaron con base en la International Commission on Microbiological Specification for Foods (2000), considerando la metodología de recuento en placas para aerobios mesófilos viables (UFC/g), *Salmonella sp.* (ausencia/25 g), mohos y levaduras (UFC/g); este último se realizó en Agar Papa Dextrosa (APD). Para *E. coli* (NMP/g) y coliformes totales (NMP/g), se utilizó la técnica del número más probable.

B. ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO

En el análisis proximal del ají mirasol y del ají panca, pre y pos-OSS, se consideró humedad (AOAC 931.04), proteína (AOAC 970.22), grasa (AOAC 920.75), ceniza (AOAC 972.15), fibra (AOAC 991.43) y carbohidratos por diferencia (AOAC, 2016). El análisis del contenido de capsaicina se hizo según el método indicado por Morales-Soriano et al. (2018), utilizando un HPLC-PDA (Milford, USA) con resultados expresados en ppm y escala de unidades Scoville (SHU). Se extrajo la capsaicina diluyendo la muestra de ají (previamente molida) en una relación 1/10 con acetonitrilo (grado HPLC). Posteriormente, fueron colocadas en un baño de agua a 80 °C por 4 horas con agitación y enfriadas a temperatura ambiente y filtradas. Luego se utilizó una alícuota de 10 µl, para inyectar al HPLC; se usó como fase móvil metanol y agua (caudal 1 ml/min), en columna XDB-C18 (Agilent Technologies, USA), temperatura ambiente y un tiempo de ejecución de 7 min. Las unidades de calor Scoville se calcularon mediante la ecuación:

$$SHU = (capsaicina \text{ (ppm)} + dihidrocapsaicina \text{ (ppm)}) * 10 * 16$$

C. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los resultados fueron ordenados en un arreglo factorial de 2 x 2 x 2 (dos pesos 3 y 4 kg, dos temperaturas de esterilización 100 y 105 °C, equivalente a 20 y 25 kPa de presión, respectivamente, y dos tiempos de permanencia 1 y 2 min) y evaluados mediante un ANOVA para determinar las interacciones de las variables sobre la carga microbiana, composición proximal y contenido de capsaicina. Además se aplicaron las pruebas de comparación de Tukey para evaluar las diferencias significativas entre los tratamientos a un nivel de significancia del 5 %. Se utilizó el programa InfoStat versión 2020.

3. Resultados y discusión

3.1 Esterilización orgánica

En la Tabla 2 se reportan los resultados microbiológicos del ají mirasol y del ají panca. En pre-OSS, en el ají mirasol se encontró 45 000 UFC/g de aerobios y 6 200 UFC/g de mohos; en el ají panca, 120 000 UFC/g de aerobios y 800 UFC/g de mohos. En ambos ajíes, el contenido de levaduras fue <10 UFC/g, *E. coli* y coliformes totales <3 NMP/g y ausencia de *Salmonella* (ausencia/25 g). Al no encontrar recuentos altos de microorganismos indicadores de contaminación fecal, se puede afirmar que las muestras fueron manejadas con procedimientos de higiene apropiados.

En pos-OSS, en el ají mirasol se obtuvieron diferencias significativas en el recuento de aerobios; se constató una reducción del recuento de 45 000 a 13 000 UFC/g y en mohos de 6 200 a 10 UFC/g. En el ají panca se observó la misma tendencia, en aerobios se obtuvo una reducción de 120 000 a 10 UFC/g y en mohos de 800 a <10 UFC/g. Se reportaron valores del contenido de levaduras ≤10 UFC/g, *E. Coli* <3 NMP/g, ausencia en *Salmonella* y coliformes totales <3 NMP/g para ambas variedades de ajíes. Se determinó que al aplicar vapor saturado al ají mirasol y al ají panca las muestras cumplen con los requisitos de aerobios mesófilos, coliformes totales y *Salmonella* estipulados en la Norma 591-2008 (Norma Sanitaria, 2008), lo cual ofrece ventajas comparativas frente a otros métodos como la radiación ultravioleta, radiación ionizante, microondas y radiofrecuencia aplicadas a alimentos deshidratados (Gabriel et al., 2020^a, 2020^b;

Molnár et al., 2018); por esta razón, en Europa es el método más aceptado (Eliasson et al., 2015). Esta tecnología es una gran alternativa para la descontaminación microbiana.

Tabla 2. Carga microbiana promedio pre y pos-OSS de ají mirasol y de ají panca

Muestra	Tratamientos	Aerobios (UFC/g)	Mohos (UFC/g)	Levaduras (UFC/g)	E. Coli (NMP/g)	Salmonella (ausencia/ 25 g)	Coliformes totales (NMP/g)
Ají mirasol	T0 - pre-OSS	45 000	6 200	<10	<3	ausencia	<3
	T1 - pos-OSS	39 000 ^b	60 ^a	<10 ^a	<3 ^a	ausencia	<3 ^a
	T2 - pos-OSS	32 000 ^b	<10 ^b	<10 ^a	<3 ^a	ausencia	<3 ^a
	T3 - pos-OSS	39 000 ^b	60 ^a	<10 ^a	<3 ^a	ausencia	<3 ^a
	T4 - pos-OSS	32 000 ^b	10 ^b	<10 ^a	<3 ^a	ausencia	<3 ^a
	T5 - pos-OSS	190 000 ^c	<10 ^b	<10 ^a	<3 ^a	ausencia	<3 ^a
	T6 - pos-OSS	13 000 ^a	10 ^b	<10 ^a	<3 ^a	ausencia	<3 ^a
	T7 - pos-OSS	190 000 ^c	60 ^a	<10 ^a	<3 ^a	ausencia	<3 ^a
	T8 - pos-OSS	32 000 ^b	<10 ^b	10 ^a	<3 ^a	ausencia	<3 ^a
Ají panca	T0 - pre-OSS	120 000	800	<10	<3	ausencia	<3
	T1 - pos-OSS	2 600 ^b	<10 ^a	<10 ^a	<3 ^a	ausencia	<3 ^a
	T2 - pos-OSS	60 ^a	10 ^a	<10 ^a	<3 ^a	ausencia	<3 ^a
	T3 - pos-OSS	3 000 ^b	100 ^d	10 ^a	<3 ^a	ausencia	<3 ^a
	T4 - pos-OSS	6 000 ^c	40 ^c	<10 ^a	<3 ^a	ausencia	<3 ^a
	T5 - pos-OSS	52 000 ^d	<10 ^a	<10 ^a	<3 ^a	ausencia	<3 ^a
	T6 - pos-OSS	10 ^a	20 ^b	<10 ^a	<3 ^a	ausencia	<3 ^a
	T7 - pos-OSS	4 300 ^{bc}	<10 ^a	<10 ^a	<3 ^a	ausencia	<3 ^a
	T8 - pos-OSS	400 ^a	10 ^a	<10 ^a	<3 ^a	ausencia	<3 ^a

Nota: Letras diferentes (^a, ^b, ^c, ^d) indican diferencias significativas con la prueba de comparación de Tukey ($p \leq 0.05$). UFC: Unidad formadora de colonia, NMP: Número más probable.

El análisis de varianza y la prueba de Tukey (Tabla 3 y 4), en el ají mirasol mostró diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre las interacciones de las siguientes variables: peso-temperatura, en el recuento de aerobios; peso-tiempo-temperatura, en mohos. Asimismo, en el ají panca se constataron diferencias significativas entre las interacciones: peso-temperatura-tiempo en ambos recuentos (aerobios y mohos), lo que indica un efecto directo de las variables independientes (peso, tiempo y temperatura) estudiadas en la inactivación de los microorganismos; similares resultados encontraron Guevara et al. (2017) en el yacón y Molnár et al. (2018) en la paprika.

En el ají mirasol los mejores resultados se obtuvieron con el tratamiento T6: 3 kg/saco, 105 °C por 3 min, y en el ají panca con los tratamientos T6 y T2: 3 y 4 kg/saco, 105 °C y 3 min. Al respecto, Molnár et al. (2018) indican que la temperatura en el tratamiento con vapor es efectiva para la descontaminación de aerobios, mohos, coliformes y enterobacterias en la paprika a temperaturas entre 108-125 °C y tiempos entre 20-120 segundos; asimismo, Djordjević et al. (2019) consideran 130 °C y 1.2 min para una esterilización efectiva con vapor contra bacterias y sus esporas en la pimienta negra.

Tabla 3. Análisis de varianza para recuento de aerobios

Variable	gl	Ají mirasol					Ají panca				
		Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Fcal	p valor	N	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Fcal	p-valor	N
Efectos principales											
A	1	29 990 940 000	29 990 940 000	1542.98	<0.0001	s	772 912 300	772 912 300	1 331.23	<0.0001	s
B	1	65 340 000	65 340 000	3.36	0.0854	n.s	642 093 460	642 093 460	110.91	<0.0001	s
C	1	45 205 440 000	45 205 440 000	2 325.73	<0.0001	s	1 165 411 940	116 541 194	2 007.25	<0.0001	s
Interacciones											
AB	1	72 106 667	72 106 667	3.71	0.0721	n.s	1 092 393 280	109 239 328	1 881.49	<0.0001	s
AC	1	38 368 006 667	38 368 006 667	1973.96	<0.0001	s	1 203 345 140	120 334 514	2 072.59	<0.0001	s
BC	1	213 606 667	213 606 667	10.99	0.0044	s	1 092 447 254	109 244 725	1 881.58	<0.0001	s
Error	16	19 437 083	19 437 083				9 289 692	580 600			
Total	23	114 428 273 333					6 669 355 797				

Nota: A: peso (kg), B: tiempo (min), C: temperatura (°C), N: nivel de significancia ($p \leq 0.05$), s: significativo, n.s: no significativo.

Tabla 4. Análisis de Varianza para recuento de mohos

Variable	gl	Ají mirasol					Ají panca				
		Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Fcal	p-valor	N	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Fcal	p-valor	N
Efectos principales											
A	1	1 053.38	1 053.38	28.09	<0.0001	s	4 620.38	772 912 300	1 331.23	<0.0001	s
B	1	975.38	975.38	26.01	<0.0001	s	4 620.38	642 093 460	1 105.91	<0.0001	s
C	1	8 550.38	8 550.38	228.01	<0.0001	s	900.38	116 541 194	2 007.25	<0.0001	s
Interacciones											
AB	1	975.38	975.38	26.01	<0.0001	s	6 633.38	6 633.38	530.67	<0.0001	s
AC	1	900.38	900.38	24.01	0.0002	s	1 890.38	1 890.38	151.23	<0.0001	s
BC	1	975.38	975.38	26.01	<0.0001	s	1 890.38	1 890.38	151.23	<0.0001	s
Error	16	600.00	37.50				200.00	12.50			
Total	23	15 005.63					21 655.63				

Nota: A: peso (kg), B: tiempo (min), C: temperatura (°C), N: nivel de significancia ($p \leq 0.05$), s: significativo, n.s: no significativo

3.2 Caracterización del ají mirasol y del ají panca

En el pre-OSS para el ají mirasol y el ají panca se encontró proteína entre 9-14 %, grasa 1-10 %, fibra 11-14 % y carbohidratos 55-70 %; estos hallazgos son superiores al 0.9-2.5 % en proteínas, 0.7-0.8 % en grasa, 2.4-2.9 % en fibra y 8.8-12.4 % en carbohidratos reportados por Rodríguez (2016), pero similar a lo indicado por Kim et al. (2019) y Rojas et al. (2016) para *Capsicum*. Mudrić

et al. (2017) mencionan que el alto contenido de carbohidratos se debe principalmente a la presencia de glucosa, fructosa y sacarosa, pudiendo encontrarse mayor cantidad de azúcar en el ají mirasol y en el ají panca (Aranha et al., 2017). Algunas diferencias en cuanto a la composición pueden deberse al contenido de humedad y otras condiciones ambientales (Gurung et al., 2011). En cuanto al contenido de capsaicina, se determinó inicialmente 863.2 y 405.6 ppm en el ají mirasol y en el ají panca, respectivamente, inferior a los rangos reportados por Meckelmann et al. (2014) con valores entre 3980 y 15 150 ppm, lo que indica que las diferencias en contenidos de capsaicina pueden deberse a la interacción con el ambiente, genotipo, estrés hídrico y temperatura (Gurung et al., 2011), conocido en poscosecha como la variabilidad, debido a los factores ambientales y culturales. Se debe considerar que la capsaicina suele concentrarse en las semillas y en el pericarpio de los ajíes (Claros, 2016).

Al evaluar los resultados del análisis proximal para el ají mirasol y el ají panca, pre y pos-OSS (Tabla 5), no se encontraron diferencias significativas para cenizas en el ají mirasol y proteína en el ají panca. La evaluación estadística muestra diferencias significativas en el contenido de capsaicina entre el pre y pos-OSS para ambos ajíes; esta pérdida puede deberse a la intensidad del tratamiento, o a factores como temperatura y tiempo de proceso (Carranza & Meza, 2015; Sanatombi & Rajkumari, 2019). Al respecto Henderson & Henderson (1992) indicaron que por efecto de la temperatura ocurre la degradación del contenido capsaicina, debido a que los grupos alquilo de la capsaicina son fragmentados, oxidados para dar vainillina y otros fenoles, en primer y segundo lugar, y por último la formación de alquilamida.

Tabla 5. Análisis de la composición proximal y contenido de capsaicina pre y pos-OSS del ají mirasol y ají panca

Componentes	Ají mirasol		Ají panca	
	pre-OSS	pos-OSS	pre-OSS	pos-OSS
Proteína (%)	9.8±0.43 ^a	13.8±0.34 ^b	15.4±0.65 ^a	15.8±0.80 ^a
Grasa (%)	1.3±0.36 ^a	10.1±0.17 ^b	1.9±0.30 ^a	10.6±0.72 ^b
Fibra (%)	11.9±0.45 ^a	14.2±0.50 ^b	19.5±0.62 ^a	16.1±0.40 ^b
Cenizas (%)	6.9±0.43 ^a	6.3±0.20 ^a	8.8±0.43 ^a	7±0.70 ^b
Carbohidratos (%)	69.9±0.60 ^a	55.6±0.70 ^b	54.4±0.55 ^a	50.4±0.72 ^b
Capsaicina (ppm)	863.2±2.90 ^a	751.9±3.80 ^b	405.6±3.10 ^a	315.1±3.37 ^b
Capsaicina (SHU)	10 612±4.35 ^a	10 100±10 ^b	5 129±3.60 ^a	4 391±6.55 ^b

Nota: Los resultados se expresan en base seca (b.s) como el promedio ± la desviación estándar de tres repeticiones. Las letras diferentes (^{a,b}) indican diferencias significativas según la prueba de comparación de Tukey ($p \leq 0.05$).

5. Conclusiones

Se determinó que la interacción peso-temperatura para el ají mirasol y peso-temperatura-tiempo para el ají panca son significativas en la reducción de aerobios y mohos, y que se obtienen mejores resultados con 3 kg de ají mirasol, 105 °C por 3 min, y con 3 y 4 kg de ají panca, 105 °C por 3 min, lo que demuestra que el tratamiento OSS es eficiente en procesos de descontaminación microbiana. El proceso OSS afecta la composición proximal de ají mirasol y del ají panca

a excepción de ceniza y proteína, respectivamente; el contenido de capsaicina en el ají mirasol disminuyó de 863.2 a 751.9 ppm, y en el ají panca de 405.6 a 315.1 ppm.

Referencias

- AOAC International. (2016). *Official Methods of Analysis of the AOAC International* (G. W. Latimer, Ed. 20.^a ed., Vol. 2). AOAC International.
- Aranha, B. C., Hoffmann, J. F., Barbieri, R. L., Rombaldi, C. V., & Chaves, F. C. (2017). Untargeted Metabolomic Analysis of *Capsicum* spp. by GC-MS. *Phytochemical Analysis*, 28(5), 439–447. <https://doi.org/10.1002/pca.2692>
- Bortolin, R. C., Caregnato, F. F., Divan Junior, A. M., Zanotto-Filho, A., Moresco, K. S., De Oliveira Rios, A., De Oliveira Salvi, A., Ortmann, C. F., De Carvalho, P., Reginatto, F. H., Gelain, D. P., & Fonseca Moreira, J. C. (2016). Chronic Ozone Exposure Alters the Secondary Metabolite Profile, Antioxidant Potential, Anti-inflammatory Property, and Quality of Red Pepper Fruit from *Capsicum baccatum*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 129, 16–24. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.03.004>
- Carranza, L., & Meza, D. (2015). Efecto del tiempo y temperatura de pasteurización en la pérdida color y pungencia en una pasta de rocoto (*Capsicum pubescens*) [Tesis de ingeniería, Universidad Nacional del Santa]. Repositorio institucional digital. <http://repositorio.uns.edu.pe/handle/UNS/2631>
- Carrizo, C., Barfuss, M. H. J., Sehr, E. M., Barboza, G. E., Samuel, R., Moscone, E. A., & Ehrendorfer, F. (2016). Phylogenetic Relationships, Diversification and Expansion of Chili Peppers (*Capsicum*, *Solanaceae*). *Annals of Botany*, 118(1), 35–51. <https://doi.org/10.1093/aob/mcw079>
- Claros, J. (2016). Bioinsecticidas de capsaicinoides y glucosinolatos en el control de insectos plaga en las plantas de *Spartium junceum* L. (*Fabales; Leguminosae*) en el Valle del Mantaro [Tesis de maestría, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio Institucional Digital UNCP. <https://bit.ly/2YwbcZz>
- Djordjević, M., Sterniša, M., Smole Možina, S., Beszédes, S., Šoronja Simović, D., Hodúr, C., Jokić, A., & Šereš, Z. (2019). Black Pepper (*Piper nigrum* L.) Bacterial Decontamination by Sterilization and Microwave Treatments. *Analecta Technica Szegedinsia*, 13(2), 1-5. <https://doi.org/10.14232/analecta.2019.2.1-5>
- Eliasson, L., Isaksson, S., Lövenklev, M., & Ahrné, L. (2015). A Comparative Study of Infrared and Microwave Heating for Microbial Decontamination of Paprika Powder. *Frontiers in Microbiology*, 6:1071. <https://doi:10.3389/fmicb.2015.01071>
- Gabriel, A. A., David, M. M. C., Elpa, M. S. C., & Michelena, J. C. D. (2020a). Decontamination of Dried Whole Black Peppercorns Using Ultraviolet-c Irradiation. *Food Microbiology*, 88, 103401. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2019.103401>
- Gabriel, A. A., Melo, K. M. D., & Michelena, J. C. D. (2020b). Determination of the Utility of Ultraviolet-C Irradiation for Dried Bay Leaves Microbial Decontamination through Safety and Quality Evaluations. *LWT*, 117, 108634. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108634>
- Guevara, A., Cancino Chávez, K., & Llontop, G. (2017). Efecto del sistema de esterilización orgánica (OSS) en las propiedades nutricionales y funcionales del yacón (*Smallantus sonchifolius* Poepp. & Endl.). *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 83(3), 308–318. <https://doi.org/10.37761/rsqp.v83i3.115>
- Guevara, A., Nolazco, D., Cancino, K., & Oliva, C. (2016). Descontaminación microbiana de la maca (*Lepidium meyenii*) aplicando el sistema de esterilización orgánica (OSS) para preservar sus propiedades nutricionales y sensoriales [Microbial Decontamination of Maca (*Lepidium meyenii*) Applying Organic Sterilization System (OSS) to Preserve Its Nutritional and Sensory Properties]. *Scientia Agropecuaria*, 7(1), 59–66. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2016.01.06>

- Guillen, N. G., Tito, R., & Mendoza, N. G. (2018). Capsaicinoids and Pungency in *Capsicum chinense* and *Capsicum baccatum* Fruits. *Pesquisa Agropecuaria Tropical*, 48(3), 237–244. <https://doi.org/10.1590/1983-40632018v4852334>
- Gurung, T., Techawongstien, S., Suriharn, B., & Techawongstien, S. (2011). Impact of Environments on the Accumulation of Capsaicinoids in *Capsicum* spp. *HortScience*, 46(12), 1576–1581. <https://doi.org/10.21273/hortsci.46.12.1576>
- Gutiérrez-Rosati, A., & Vega, B. (2016). Micropropagación in vitro de "ají marisol" *Capsicum baccatum* var. *pendulum*. *The Biologist*, 14(2), 171–181. https://sisbib.unmsm.edu.pe/bvrevistas/biologist/v14_n2/pdf/a02v14n2.pdf
- Henderson, D. E., & Henderson, S. H. (1992). Thermal Decomposition of Capsaicin: 1. Interactions with Oleic Acid at High Temperatures. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 40, 2263–2268. doi:10.1021/jf00023a042
- International Commission on Microbiological Specification for Foods. ICMSF. (2000). *Microorganisms in Foods* (3.^a ed., Vol. 1). Acribia.
- Kantar, M. B., Anderson, J. E., Lucht, S. A., Mercer, K., Bernau, V., Case, K. A., Le, N. C., Frederiksen, M. K., DeKeyser, H. C., Wong, Z. Z., Hasting, J. C., & Baumler, D. J. (2016). Vitamin Variation in *Capsicum* spp. Provides Opportunities to Improve Nutritional Value of Human Diets. *PLoS ONE*, 11(8), 1–12. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0161464>
- Kim, E., Lee, S., Baek, D., Park, S., Lee, S., Ryu, T., Lee, S., Kang, H., Kwon, O., Kil, M., & Oh, S. (2019). A Comparison of the Nutrient Composition and Statistical Profile in Red Pepper Fruits (*Capsicum annuum* L.) Based on Genetic and Environmental Factors [Una comparación de la composición de nutrientes y el perfil estadístico en frutos de pimiento rojo (*Capsicum annuum* L.) basada en factores genéticos y ambientales]. *Applied Biological Chemistry*, 62(48), s. p. <https://doi.org/10.1186/s13765-019-0456-y>
- Meckelmann, S. W., Riegel, D. W., van Zonneveld, M., Ríos, L., Peña, K., Mueller-Seitz, E., & Petz, M. (2014). Capsaicinoids, Flavonoids, Tocopherols, Antioxidant Capacity and Color Attributes in 23 Native Peruvian Chili Peppers (*Capsicum* spp.) Grown in Three Different Locations. *European Food Research and Technology*, 240(2), 273–283. <https://doi.org/10.1007/s00217-014-2325-6>
- Molnár, H., Bata-Vidács, I., Baka, E., Cserhalmi, Z., Ferenczi, S., Tömösközi-Farkas, R., Adányi, N., & Székács, A. (2018). The Effect of Different Decontamination Methods on the Microbial Load, Bioactive Components, Aroma and Colour of Spice Paprika. *Food Control*, 83, 131–140. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2017.04.032>
- Morales-Soriano, E., Kebede, B., Ugás, R., Grauwet, T., Van Loey, A., & Hendrickx, M. (2018). Flavor Characterization of Native Peruvian Chili Peppers Through Integrated Aroma Fingerprinting and Pungency Profiling. *Food Research International*, 109, 250–259. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.04.030>
- Mudrić, S., Gašić, U. M., Dramićanin, A. M., Ćirić, I. Z., Milojković-Opsenica, D. M., Popović-Dordević, J. B., Momirović, N. M., & Tešić, Ž. Lj. (2017). The Polyphenolics and Carbohydrates as Indicators of Botanical and Geographical Origin of Serbian Autochthonous Clones of Red Spice Paprika. *Food Chemistry*, 217, 705–715. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.09.038>
- Norma Sanitaria que establece los criterios microbiológicos de calidad sanitaria e inocuidad para los alimentos y bebidas de consumo humano, Resolución Ministerial 591-2008/MINSA. (2008). <https://bit.ly/3nzPGzb>
- Plaza, A., & Lock-de-Ugaz, O. (1997). Colorantes naturales y la oleorresina de paprika. *Revista de Química PUCP* 11(1), 73-93. <https://bit.ly/3fhGIGl>
- Rojas, R., Patel, K., Ruiz, C., Calderón, R., Asencios, E., Quispe, F., & Marcelo, M. (2016). *Ajies nativos peruanos: Caracterización agro-morfológica, químico-nutricional y sensorial*. Universidad Peruana Cayetano Heredia. https://issuu.com/jerimo/docs/catalogo_aj_es_nativos_peruanos

- Rodríguez, H. (2016). *Ají peruano: Historia, cultura, sociedad y gastronomía*. Universidad Nacional Agraria La Molina Perú.
- Salazar, E. (2016). Efecto bacteriostático y bactericida de extractos de ají (*Capsicum chinense*) y pimiento (*Capsicum annuum* var. *annuum*) sobre cultivos de *Escherichia coli* ATCC 25922 y *Staphylococcus aureus* ATCC 25923 [Tesis de grado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Cybertesis: Repositorio de Tesis Digitales UNMSM. <https://hdl.handle.net/20.500.12672/5034>
- Sanatombi, K., & Rajkumari, S. (2019). Effect of Processing on Quality of Pepper: A Review. *Food Reviews International*, 36(6), 1–18. doi:10.1080/87559129.2019.1669161
- Villar, J. (2019). Capsaicinoides, compuestos fenólicos, actividad antioxidante in vitro y color de 100 accesiones de *Capsicum* spp. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio institucional UNALM. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/4016>

Comparación de métodos sensoriales descriptivos: perfil flash y preguntas CATA para caracterizar infusiones de muña (*Minthostachys mollis*)

(Comparison of descriptive sensory methods: flash profile and CATA questions to characterize muña infusions (Minthostachys mollis))

Reynaldo J. Silva Paz¹, Gabriela N. Pichiuza Gonzales², Amparo Eccoña Sota³

Resumen

Este estudio compara dos métodos descriptivos basados en las percepciones de los consumidores para conocer el perfil sensorial de infusiones de muña. Las personas participantes evaluaron cinco bebidas de muña utilizando la metodología perfil flash (Flash profile-FP) (n=20) y preguntas CATA (marque todo lo que corresponda o Check-All-That-Apply-CATA, siglas en inglés) (n=105). Para el análisis de datos, se utilizó el análisis procruster generalizado en el FP y el test de Q Cochran con el análisis de correspondencia para las preguntas CATA. Además, se utilizó el coeficiente RV para comparar los mapas sensoriales generados por ambos métodos, usando el software R y la versión de prueba XLSTAT. Los resultados del perfil flash y preguntas CATA, evidenciaron la formación de cuatro grupos. El primer grupo conformado por las muestras D y E; el segundo, tercero y cuarto grupo, A, B y C, respectivamente. El coeficiente RV fue de 0.94, lo que indica una similitud muy alta entre los dos métodos. Estos resultados demuestran precisión y reproducibilidad de la información sensorial obtenida por los consumidores que aplican diferentes métodos para describir los alimentos. El perfil flash es más lento y laborioso, siendo adecuado para estudios exploratorios con un menor número de consumidores, mientras que las preguntas CATA son más rápidas y requieren menos mano de obra, por lo que son adecuadas, para estudios con un grupo más amplio de consumidores.

Palabras clave

Perfil flash; CATA; coeficiente Rv; sensorial; descriptivo.

Abstract

This study compares two descriptive methods based on consumers' perceptions of the sensory profile of Andean Mint (Muña) herbal teas. Participants evaluated five Andean Mint beverages using flash profile (FP) methodology (n=20) and Check-All-That-Apply (CATA) questions (n=105). For data analysis, generalized procruster analysis (GPA) was used for the PF and the Cochran Q test with correspondence analysis for the CATA questions. In addition, the RV coefficient was used to compare the sensory maps generated by both methods, using the R software and XLSTAT-test version. The results of the flash profile and CATA questions showed the formation of four groups, the first group consisting of samples D and E; the second, third and fourth groups, A, B and C, respectively. The RV coefficient was 0.94, indicating a very high similarity between both methods. These results demonstrate a high accuracy and reproducibility of sensory information obtained by consumers applying descriptive sensory methods in foods. Flash profiling is slower and more labor-intensive, making it suitable for exploratory studies with a smaller number of consumers, while CATA questions are faster and less labor-intensive, making it suitable for studies with a larger group of consumers.

Keywords

Flash profile; CATA; Rv coefficient; sensory; descriptive.

1 Universidad Peruana Unión, Lima, Perú. [rsilva@upeu.edu.pe, <https://orcid.org/0000-0003-4400-7469>]

2 Universidad Peruana Unión, Lima, Perú. [gabrielapichiuza@upeu.edu.pe, <https://orcid.org/0000-0001-8090-4066>]

3 Universidad Peruana Unión, Lima, Perú. [aesota@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9418-2754>]

1. Introducción

En la industria alimentaria se realizan diversos análisis físicos, químicos y sensoriales. En el análisis sensorial existen ciertas dificultades para poder cuantificarlo de manera instrumental. La evaluación sensorial es una disciplina científica utilizada para medir, analizar e interpretar las reacciones percibidas por los sentidos (vista, gusto, olfato, oído y tacto) hacia ciertas propiedades del alimento o producto, pues no existe ninguna herramienta que pueda sustituir la respuesta humana. Por ello, la evaluación sensorial resulta un factor esencial en cualquier estudio sobre alimentos, ya que permite describir atributos del producto, encontrar diferencias o similitudes, identificar cambio de insumos o procesos, estimar la vida útil y orientar el desarrollo de un nuevo alimento (Meilgarrrd et al., 2015). Sin embargo, el elevado costo y largo tiempo que conlleva formar y mantener un panel descriptivo entrenado, es una preocupación en las industrias alimentarias, mayormente en las empresas pequeñas y del entorno académico. Por este motivo, es lógico pensar que la ciencia sensorial recurrirá hacia herramientas sensoriales más flexibles y rápidas que darían agilidad extra para la caracterización sensorial, tanto en términos de requisitos de tiempo y de formación (Kemp y Hollowood, 2018). En los últimos años se han desarrollado diversas técnicas de evaluación sensorial que han permitido obtener métodos de descripción rápida, que han logrado reducir el tiempo de entrenamiento y con ello disminuir los costos que se producen con la formación y mantenimiento de un panel entrenado; mediante estos métodos se puede trabajar directamente con consumidores (personas sin entrenamiento) para la descripción sensorial de alimentos y productos no alimentarios (Alcantara y Freitas, 2018).

El perfil sensorial descriptivo permite el desarrollo y reformulación de alimentos, identificando los atributos sensoriales esenciales para la aceptación del consumidor, generando un vínculo entre las características del producto y la percepción del cliente (Valera y Ares, 2014). Es necesario utilizar métodos descriptivos económicos, que consuman menos tiempo en la recopilación de información respecto a los métodos tradicionales (Delarue y Lawlor, 2014). Se han desarrollado métodos como el mapeo proyectivo, clasificación o Sorting, perfil flash, perfil de libre elección, marque todo lo que corresponda (CATA), comparaciones pareadas (Kemp y Hollowood, 2018), que son métodos rápidos aplicados en los consumidores. El perfil flash se ha utilizado en diferentes productos como vino (Liu et al., 2018), jugos (Montanuci et al., 2015), salsa de hongo (Silva-Paz et al., 2016) y en productos no alimentarios como raquetas de tenis (Bauer et al., 2020) y autos (Delarue y Lawlor, 2014), siendo muy utilizado en el desarrollo de nuevos productos. Por otro lado, la metodología marque todo lo que corresponda o preguntas CATA, es un formato de pregunta que se ha utilizado en los últimos años para obtener perfiles de productos de forma rápida (Valera y Ares, 2014), consiste en presentar una lista de atributos a los consumidores para que seleccionen las palabras apropiadas que describen cada muestra evaluada (Kemp y Hollowood, 2018). Se ha llevado a cabo en varios estudios, entre ellos: vino (Magimel et al., 2020), queso (Torres et al., 2017), galletas (Tarancon et al., 2015), Mandarinas (Tarancón et al., 2020), galletas saladas (Antúnez et al., 2016), arroz cocido (Pramudya y Seo, 2018), vino (Machado et al., 2019), jamón cocido (Henrique et al., 2015), pescado (Belusso et al., 2016), entre otros.

En los últimos años se ha estudiado la comparación entre los métodos sensoriales, con el fin de elegir cuál es la metodología más adecuada en la caracterización de productos de acuerdo con la percepción de los consumidores. Liu et al. (2018) compararon el Perfil de Libre Elección y el Perfil Flash, empleando como referencia el análisis descriptivo para determinar las características sensoriales de muestras de vinos. Esmerino et al. (2017) caracterizaron muestras de yogurt

griego empleando como metodologías el Perfil de pivote, marque todo lo que corresponda (CATA) y el mapeo proyectivo para determinar qué método es el más sencillo para los consumidores. De igual manera, Alexi et al. (2018) evaluaron muestras de peces cocidos a través de la comparación de las preguntas CATA con evaluadores semi-entrenados, el análisis descriptivo con panelistas capacitados y preguntas CATA con consumidores no capacitados para conocer cómo describen las muestras, encontrando similitud de resultados con los distintos métodos aplicados.

En el Perú existen diferentes variedades de plantas medicinales nativas, desde la época incaica hasta la actualidad. Estas son consumidas en bebidas o infusiones, debido a sus bondades terapéuticas (Salaverry, 2005). La muña es una planta silvestre aromática, que pertenece a la familia Lamiaceae; crece en el centro y región andina del sur del Perú, entre los 2500 y 3500 msnm, tiene una variedad de propiedades usadas en la medicina tradicional; el tradicional andino utiliza las hojas en infusiones para tratar la indigestión, náuseas, diarrea, anemia y enfermedades respiratorias (Agapito, 2004).

El objetivo de esta investigación fue comparar el perfil flash con preguntas CATA para caracterizar los atributos sensoriales de infusiones de hojas de muña.

2. Metodología

2.1. Materia prima

Las hojas de muña se obtuvieron de plantas listas para cosechar, con una altura de 30 cm, recolectadas en la localidad de Uyacoto, departamento Huancayo. Las hojas fueron seleccionadas manualmente, con características similares (tamaño $2,5 \pm 0,5$ cm de largo), color verde oscuro uniforme, en buenas condiciones para su posterior secado.

2.2. Metodología

2.2.1. PROCESO DE SECADO DE LA MUÑA

Para la obtención de las hojas deshidratadas de muñas, fueron sometidas a diferentes procedimientos. Las muestras A y B (Sin blanqueado) se secaron a 40 y 50 °C, respectivamente. Los tratamientos C, D y E, fueron sometidas a un proceso de blanqueado con 1 % de ácido ascórbico (AA) por 30 segundos a 40 °C, luego se enjuagaron con abundante agua y posteriormente secados a las temperaturas según la Tabla 1. Todos los tratamientos fueron deshidratados en un secador a túnel de bandejas (Marca: Espacio tiempo; modelo: HSB01) con una velocidad de aire 1 m/s. El proceso de secado se realizó a 40, 50 y 60 °C hasta obtener un peso constante, con un tiempo de 480, 240 y 210 min, respectivamente.

Tabla 1. Codificación de las muestras a evaluar

Muestra	Tratamiento
A	Sin blanqueado secado a 40 °C
B	Sin blanqueado secado a 50 °C
C	Blanqueado 1 % AA secado a 40 °C
D	Blanqueado 1 % AA secado a 50 °C
E	Blanqueado 1 % AA secado a 60 °C

2.2.2. PREPARACIÓN Y PRESENTACIÓN DE LAS INFUSIONES

Para la preparación de las diferentes infusiones, se pesó 1 g de hojas secas y se dejó reposar por 3 min en 200 ml de agua a 98 ± 2 °C, este proceso se realizó para cada tratamiento, luego se filtró y se almacenaron en termos herméticos antes de realizar los ensayos sensoriales.

A cada consumidor se le entregó 20 ml de cada infusión con una temperatura de 45 ± 5 °C en vasos de tecnopor de capacidad de 50 ml. Las muestras fueron codificadas con un número aleatorio de tres dígitos para su evaluación. Adicionalmente, se sirvió 150 ml de agua mineral a temperatura ambiente en un vaso de capacidad de 250 ml, para que los participantes se enjuaguen la boca entre cada muestra, para evitar la saturación y confusión de sabores (Kemp et al., 2018). Las muestras fueron presentadas a los evaluadores de manera simultánea múltiple y en orden aleatorio para el perfil flash y de forma monádica aleatorizada en las preguntas CATA.

2.2.3. CONSUMIDORES

Para los ensayos del perfil flash participaron 20 consumidores habituales de infusiones que radican en la ciudad de Lima (12 mujeres y ocho hombres con edades comprendidas entre 18-24 años), este número de evaluadores se planteó de acuerdo con las investigaciones de Silva-Paz et al. (2016) y Montanuci et al. (2015). En las preguntas CATA se trabajó con 100 personas que se encuentran en un rango de edad entre 18 a 25 años, todos los participantes eran consumidores regulares de productos similares, esta cantidad de consumidores es recomendado por Varela y Ares (2014).

2.2.4. PERFIL FLASH

La evaluación se realizó en cabinas individuales con luz blanca. Se realizaron tres sesiones. En la primera sesión, a los evaluadores se les indicó generar una lista individual de atributos que describiera las propiedades sensoriales que podían percibir y que les permitiera diferenciar las muestras. En la segunda sesión, se realizó una entrevista individual a cada consumidor para llegar a un consenso y evitar que dos términos en su lista describieran lo mismo. Luego, los consumidores fueron informados de los descriptores propuestos por los otros miembros del equipo, y cada uno estuvo en la condición de actualizar su lista final antes del análisis, para estar seguro de no olvidar ni confundir ningún descriptor en su propia ficha. De este modo, cada consumidor presentó una lista final de atributos. En la tercera sesión, denominada como etapa de ordenación, los productos fueron nuevamente presentados de manera simultánea y en orden aleatorio, y cada consumidor realizó la evaluación sensorial considerando los atributos elegidos por el mismo. Para tal efecto, se les pidió ordenar las muestras en orden creciente de intensidades para cada uno de los atributos definidos anteriormente, sobre una escala tipo ordinal; se permitieron empates, cada sesión tuvo una duración aproximada de 20 a 30 min para cada consumidor (Kemp y Hollowood, 2018).

2.2.5. PREGUNTAS CATA

Se solicitó a los consumidores que indiquen cuál de las palabras o atributos es el más apropiado, según su experiencia, para describir la infusión de muña que consumieron. Se les presentó una lista de 18 atributos: dulce, olor mentolado, amarillento, verdoso, olor herbal, astringente, amargo, diluido, refrescante, olor concentrado, pungencia, sabor intenso, ácido, rojizo, equilibrado, olor a

tierra, sabor mentolado y complejo sensoriales (Cabana et al., 2015; Gallego-Nicasio, 2018), que conforman la boleta de preguntas CATA, además se les pidió que marquen cuánto les gusta la infusión, para obtener datos de aceptabilidad global con una escala de 9 puntos (Varela y Ares, 2014).

2.3. Análisis estadísticos

El tratamiento estadístico para el perfil flash se realizó mediante el análisis de procrustes generalizados (GPA), este método permite alcanzar una sola configuración consenso a partir de distintos grupos de variables (Varela y Ares, 2014). En las preguntas CATA se realizó un análisis de correspondencia a la base de datos obtenidos con una tabla de contingencia, esta proporciona una representación de muestras y las variables utilizadas para describirlas, a dicha tabla se aplicó un test de Q de Cochran para encontrar diferencias significativas entre los atributos (Kemp y Hollowood, 2018; Meilgarrd et al., 2015). Además, para determinar la similitud de los mapas sensoriales de ambos métodos se determinó el coeficiente R_v y se aplicó el análisis de jerárquico de factores múltiple, para encontrar la similitud o disimilitud de los mapas sensoriales encontrados por cada método. Se utilizó el software XLSTAT 2020-versión de prueba (Addinsoft, New York, NY, USA) y el estadístico R con el paquete FactoMineR y SensoMineR (Varela y Ares, 2014).

3. Resultados

3.1. Perfil flash

En la figura 1 se presenta el análisis procuster generalizado obtenido del perfil flash. La distribución de las muestras de infusión en el mapa sensorial de dos dimensiones explica el 85,73 % de total de variabilidad de los datos. Se observa la formación de cuatro grupos: el primer grupo formado por la muestra A, segundo grupo muestra B, tercer grupo muestra C y el cuarto grupo formado por las muestras D y E. Al realizar una superposición de las muestras y atributos (Figura 1 (a) y (b)), se puede indicar los atributos o descriptores que caracterizan a cada grupo conformado. La muestra A fue descrita como aromática, esto puede atribuirse a no dañar hojas con el proceso de blanqueado y al leve proceso de secado al cual fue sometido (40 °C). La muestra B fue amarga, poco refrescante y ligeramente aromática, debido al incremento de la temperatura durante el proceso de secado (50 °C) en comparación a la muestra A. La muestra C se caracterizó como amarga, dulce, pero no presentaba el color, indicando el proceso de blanqueado con una reducida temperatura permite percibir notas ligeramente dulces. Finalmente, las muestras D y E fueron descriptas como refrescantes, herbales, amarillas, amargas y poco aromáticas producidas por el incremento de la temperatura (50 y 60 °C, respectivamente) conjuntamente con el proceso de blanqueado (1 % ácido ascórbico).

3.2. Preguntas marque todo lo que corresponda (CATA)

Todos los tratamientos fueron sometidos a la prueba Q de Cochran para cada atributo descripto por las preguntas CATA, donde no se encontraron diferencias significativas ($p > 0,05$) para trece de los dieciocho atributos (Tabla 2). Los atributos no significativos fueron dulce, olor mentolado, amarillento, verdoso, olor herbal, astringente, amargo, refrescante, olor concentrado, pungencia, rojizo, equilibrado y complejo, considerando estos descriptores similares entre las muestras. Sin

embargo, encontraron diferencias significativas ($p < 0,05$) en cinco atributos: diluido, sabor intenso, ácido, olor a tierra y sabor mentolado. El atributo diluido, las infusiones A y B fueron descritas como muy diluidas a diferencia de la muestra C (poco diluida), que fue similar a D y E. Respecto al atributo olor a tierra, las infusiones A, C, D y E fueron similares entre sí, aunque estas se diferencian de la muestra B, que fue descrita con mayor olor a tierra en comparación con la muestra E, que presentó menor olor a tierra. Las infusiones A, B y E indicaron similitud en el atributo sabor intenso, presentando un menor sabor en contraste con la muestra C, aunque la muestra D registró valores similares a esta última muestra. Para el atributo ácido, las infusiones A, B y C fueron percibidas como similares, sin embargo, las muestras D y E no mostraron este atributo. Finalmente, el atributo sabor mentolado, la muestra A indicó menor sabor mentolado en comparación a la infusión D que presentó mayor sabor a mentolado, aunque este fue similar a B, C y E.

Figura 1. Espacio sensorial de muestras (a) y de atributos o descriptores (b) mediante el GPA

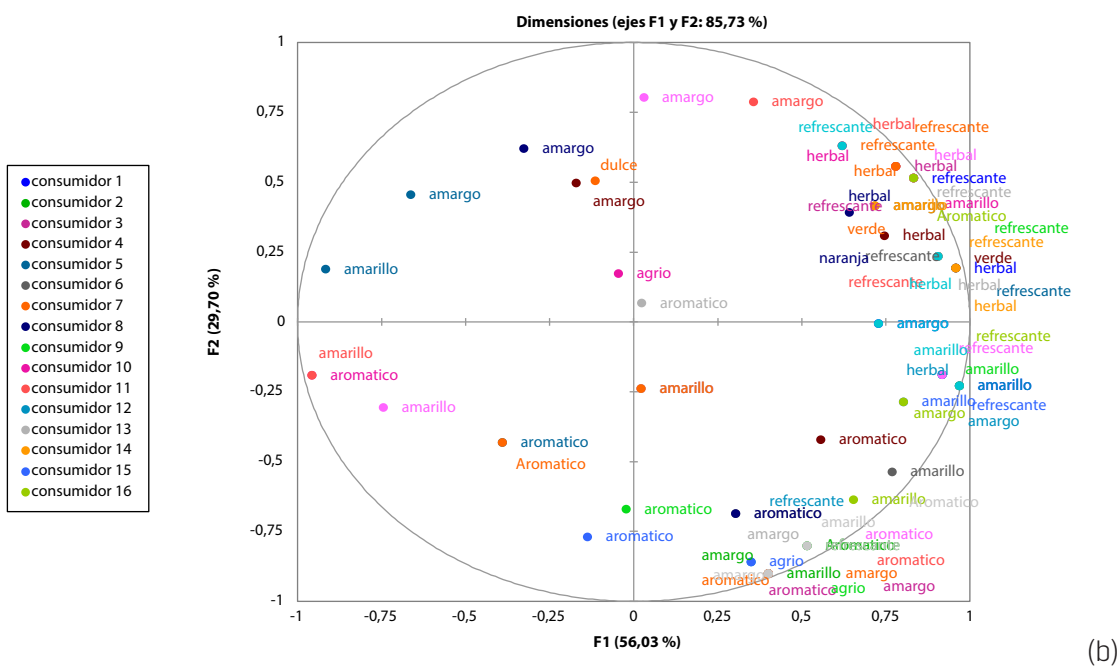
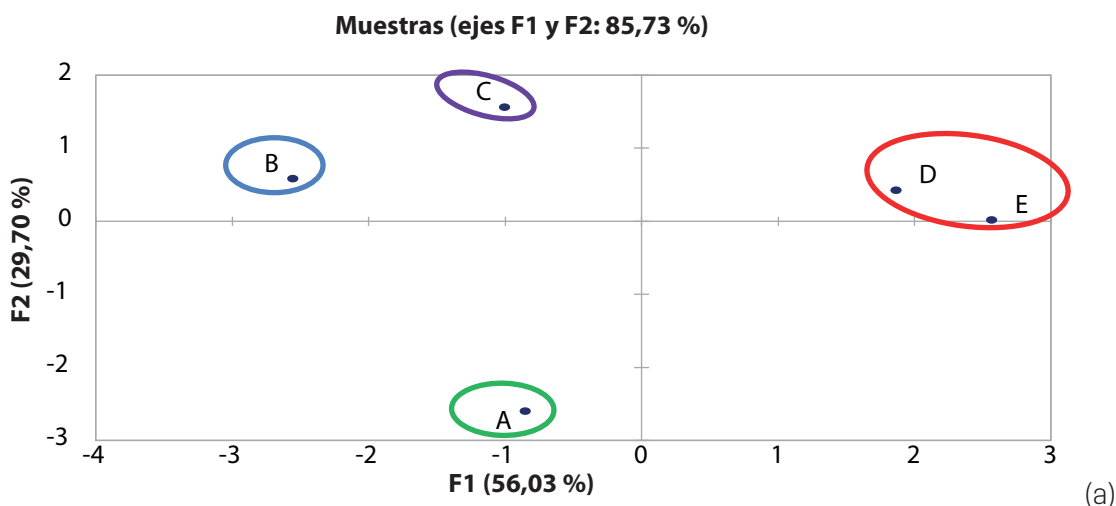


Tabla 2. Prueba Q de Cochran para las preguntas CATA para las infusiones de muña

Atributos	valor-p	A	B	C	D	E
Dulce	0,504	0,080 (a)	0,040 (a)	0,020 (a)	0,040 (a)	0,020 (a)
Olor Mentolado	0,258	0,360 (a)	0,340 (a)	0,500 (a)	0,460 (a)	0,380 (a)
Amarillento	0,677	0,680 (a)	0,640 (a)	0,680 (a)	0,600 (a)	0,600 (a)
Verdoso	0,600	0,120 (a)	0,080 (a)	0,080 (a)	0,100 (a)	0,040 (a)
Olor Herbal	0,186	0,700 (a)	0,640 (a)	0,780 (a)	0,740 (a)	0,820 (a)
Astringente	0,188	0,160 (a)	0,260 (a)	0,260 (a)	0,140 (a)	0,180 (a)
Amargo	0,181	0,220 (a)	0,280 (a)	0,360 (a)	0,340 (a)	0,400 (a)
Diluido	0,000	0,520 (c)	0,460 (bc)	0,220 (a)	0,260 (ab)	0,260 (ab)
Refrescante	0,486	0,300 (a)	0,220 (a)	0,360 (a)	0,240 (a)	0,280 (a)
Olor Concentrado	0,056	0,180 (a)	0,360 (a)	0,400 (a)	0,280 (a)	0,240 (a)
Pungencia	0,313	0,140 (a)	0,120 (a)	0,140 (a)	0,200 (a)	0,240 (a)
Sabor Intenso	0,001	0,240 (a)	0,280 (a)	0,520 (b)	0,360 (ab)	0,200 (a)
Ácido	0,005	0,080 (ab)	0,100 (ab)	0,140 (b)	0,000 (a)	0,000 (a)
Rojizo	0,592	0,020 (a)	0,020 (a)	0,040 (a)	0,000 (a)	0,040 (a)
Equilibrado	0,988	0,200 (a)	0,180 (a)	0,180 (a)	0,160 (a)	0,180 (a)
Olor a Tierra	0,014	0,180 (ab)	0,360 (b)	0,260 (ab)	0,180 (ab)	0,120 (a)
Sabor Mentolado	0,044	0,260 (a)	0,380 (ab)	0,380 (ab)	0,500 (b)	0,440 (ab)
Complejo	0,265	0,140 (a)	0,120 (a)	0,220 (a)	0,120 (a)	0,180 (a)

La Figura 2 muestra el mapa sensorial de las infusiones de muña y los descriptores sensoriales seleccionados por los consumidores. Se observan cuatro subconjuntos bien definidos: el primer grupo formado por la infusión A que se caracterizó por ser verdoso, equilibrado y diluido; el segundo grupo por la infusión B que se caracterizó por tener olor a tierra y ser astringente; el tercer grupo por la infusión C que se caracterizó por tener un olor concentrado y sabor intenso. Por último, el cuarto grupo formado por las infusiones D y E, que se caracterizaron por tener olor herbal, sabor mentolado y ser pungente.

Figura 2. Espacio sensorial mediante el análisis de correspondencia (MCA) de los datos para las preguntas CATA

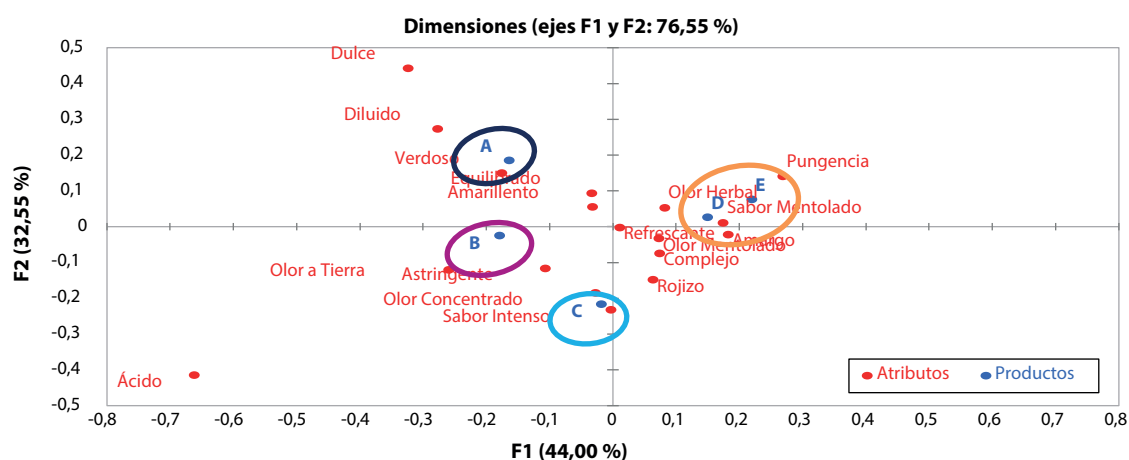
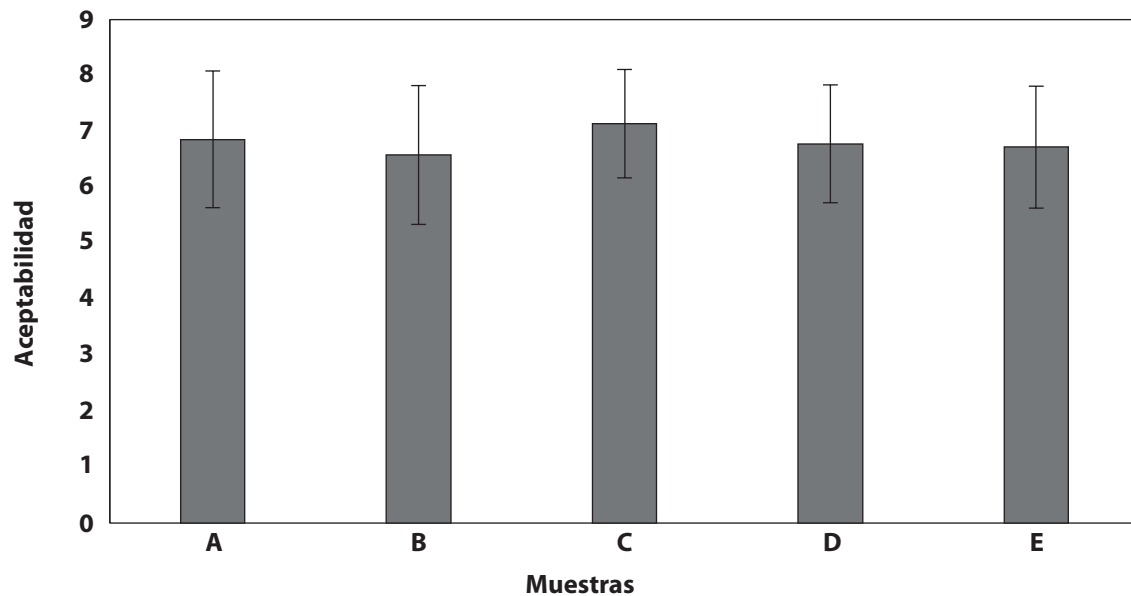


Figura 3. Representación del análisis de aceptabilidad de 9 escalas

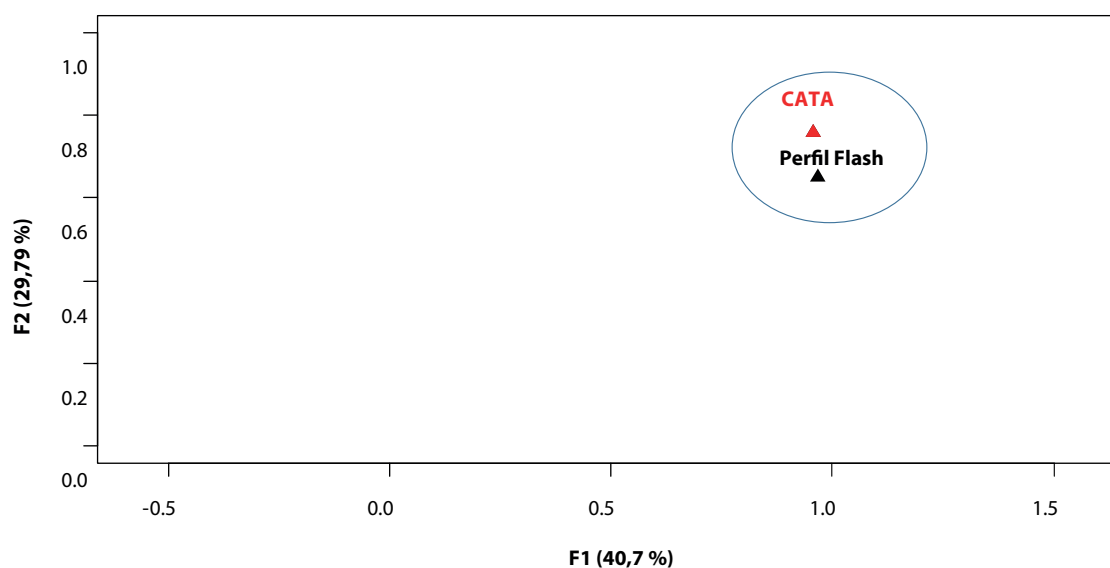


La Figura 3 muestra el grado de aceptabilidad de las muestras mediante una escala hedónica de 9 puntos. Las cinco infusiones de muña de diferentes tratamientos no presentaron diferencias significativas ($P > 0.05$), por lo tanto, los consumidores aceptan las diferentes infusiones de muña, indistintamente del proceso al cual fueron sometidos, por lo que no distinguen la aplicación del proceso de blanqueado o el incremento de la temperatura en el proceso de secado en la infusión preparada. La calidad de un alimento, va más allá de los aspectos sanitarios y nutricionales, dado que está basado en las características de color, sabor y olor. Sin embargo, el color es la primera característica del alimento que el consumidor aprecia y ejerce una poderosa influencia en la decisión del consumidor. La aceptabilidad permite conocer el agrado o desagrado de una muestra por los consumidores, no obstante, este no indica que un alimento al ser calificado como me gusta mucho, pueda garantizar que el catador vaya a comprarlo, existen otros factores como precio, empaque, entre otros (Consejo Superior de Investigaciones Científicas-CSIC, 2011).

3.3. Comparación de configuraciones de mapas sensoriales obtenido por los métodos descriptivos para las infusiones de muña

La Figura 4 muestra la representación de los métodos perfil flash y preguntas CATA mediante el análisis de jerarquización factorial múltiple, donde se observó que ambos métodos obtienen resultados similares, es decir, la proximidad que presenta cada método demuestra una alta confiabilidad y semejanza. Para conocer la similitud de los resultados del método perfil flash y preguntas CATA se determinó el coeficiente Rv. El coeficiente Rv fue de 0,94, lo que indica que los mapas sensoriales multivariados obtenidos por los diferentes métodos fueron similares, obteniendo la misma cantidad de grupos y descriptores dentro del espacio sensoriales.

Figura 4. Representación de los métodos perfil flash y CATA mediante el HMFA



4. Discusión

El perfil flash en el mapa sensorial de las muestras (Figura 1) explicó el 85,73 % de los datos, resultados similares reportaron Silva et al. (2016), Montanuci et al. (2015) y Liu et al. (2018) quienes informaron valores de 82,60, 90,11 y 45 % en la caracterización sensorial de salsas de hongo, jugos de maracuyá y vinos, respectivamente. Al realizar una superposición de las muestras y atributos (Figura 1 (a) y (b)), se pueden indicar los atributos o descriptores que caracterizan a cada una de las muestras: la muestra A fue descrita como aromática, la muestra B amarilla y amarga, la muestra C amarga y dulce, las muestras D y E como refrescante, herbal, amarillo y amargo. Las muestras tratadas con altas temperatura y con ácido ascórbico presentan mayor cantidad de descriptores. Esto puede atribuirse a que las muestras están más concentradas debido al proceso de secado, el cual reduce el contenido de agua y concentra los compuestos químicos. Cabana et al. (2015), estudió extractos acuosos de muña-muña encontrando derivados de catequina, naringina y quercetina, que serían responsables del amargor y astringencia.

Por otro lado, se encontró en la literatura características sensoriales de algunos compuestos que se han detectado en el aceite esencial de muña, como α -terpineol, citronelol, carvona que generan características herbáceas y mentoladas; linalool y terpineol, que proveen notas florales y dulce-florales, el timol aporta aroma maderoso, y el limoneno como alimonado y pungente. Además, el mentol, sería el responsable del aroma y sabor mentol/menta, los terpenos mentona, carveol y dihidrocarveol; pulegona, y carvilacetato, estos dos últimos presentes en la muña proveen notas especiadas y amaderadas. Este comportamiento fue registrado por Mendez-Ancca et al. (2018) quienes indicaron que los consumidores describen más los productos con mayor concentración de muña, que son representados por tener un olor muy pronunciado y no por ello son necesariamente agradables. El perfil flash permite realizar rápidamente un mapa sensorial de un conjunto de productos. Es fácil comprender para los panelistas, y puede adaptarse cuando sea necesario tener una respuesta rápida. Puede realizarse con evaluadores

que hablan diferentes idiomas, por lo tanto, es bien adaptado para los estudios interculturales. La comparación simultánea de todas las muestras en conjunto permite una mejor discriminación de los productos versus un perfil convencional. La principal limitación del perfil flash es el número de muestras que pueden ser descritas. Para evitar problemas derivados de la saturación y de la memoria a corto plazo, se recomienda limitar el número de muestras a siete. Este número puede aumentarse si solo le interesa el aspecto visual de los productos. Otro inconveniente del perfil flash es que, como cada panelista tiene su propia lista de atributos, la interpretación del círculo de correlación puede ser bastante compleja.

Las preguntas CATA en sus dos primeras dimensiones explican el 76,55 % de la varianza total (Figura 2). Estos resultados concuerdan con lo presentado por Henrique et al. (2015) que registró 82,9 % Al igual que el método perfil flash. Las preguntas CATA presentaron la formación de cuatro grupos: el primer grupo formado por la infusión A que se caracterizó por ser verdoso, equilibrado y diluido; el segundo grupo por la infusión B, que se caracterizó por tener olor a tierra y ser astringente; el tercer, es la infusión C, que se caracterizó por su olor concentrado y sabor intenso. Por último, el cuarto grupo formado por las infusiones D y E, que se caracterizaron por tener olor herbal, sabor mentolado y ser pungente. Al igual, que en el perfil flash, se observa que las muestras tratadas con altas temperaturas y con ácido ascórbico presentan mayor cantidad de descriptores. Mendez-Ancca et al. (2018) encontraron que los productos con mayor concentración de muña, presentan un olor fuerte, aunque no son necesariamente agradables, es decir, el deseo de adquirir un producto depende de la impresión agradable o desagradable (Consejo Superior de Investigaciones Científicas-CSIC, 2011).

El aumento de la temperatura del aire de secado reduce considerablemente el tiempo necesario para que las hojas de muña alcancen un menor contenido de humedad, este fenómeno fue observado por Martins et al. (2018) y Gasparin et al. (2017) quienes estudiaron el secado hojas de timbó y menta, respectivamente. El efecto de la temperatura del aire de secado sobre la reducción del tiempo de secado de las hojas de muña, puede atribuirse al hecho de que la causa principal del proceso de secado es la diferencia de presión de vapor entre el producto y el aire de secado. Este comportamiento de menor tiempo de secado a mayores temperaturas puede explicarse por la estructura de las hojas, condiciones de secado, aumento de los coeficientes de transferencia de masa y el gradiente de presión de vapor que aumenta entre el aire de secado y el aire dentro de las hojas. Por el contrario, a temperaturas más bajas, el tiempo necesario para eliminar el agua presente en la superficie del producto es mayor a temperaturas más altas, debido a que a menor temperatura la contribución a la remoción de agua presente en la superficie es baja (Bensebia y Allia, 2015; Da Silva et al. 2019). Por lo que, una mayor temperatura favorece al incremento de percepción de los atributos sensoriales por parte de los consumidores, a diferencia del proceso de secado a bajas temperaturas, donde tiempos largos de exposición reduce los componentes volátiles disminuyendo la selección y descripción de los atributos sensoriales por parte de los participantes.

Respecto a la comparación de los resultados del método perfil flash y preguntas CATA, aplicado en consumidores (Figura 4), se encontró que el coeficiente R_v fue 0,94, por lo que los mapas sensoriales obtenidos por ambos métodos fueron similares. Estos resultados concuerdan con lo reportados por Liu et al. (2018), Esmerino et al. (2017), Alexi et al. (2018) y Vidal et al. (2019), lo que indican que con un coeficiente $R_v \geq 0,7$ se considera una buena similitud entre mapas sensoriales. Es decir, la gráfica de análisis de correspondencia construida con los datos de preguntas CATA fue similar a la gráfica del análisis procrustes generalizado obtenida partir del perfil flash.

5. Conclusiones

La aplicación de métodos sensoriales descriptivos rápidos complementa el análisis descriptivo tradicional. El perfil flash permitió la generación de descriptores (herbal, refrescante, agrio, amargo, amarillo y aromático) en las infusiones de muña. Las preguntas CATA facilitaron una mejor clasificación y un mayor número de descriptores para las diferentes infusiones, debido a que se les proporcionó un vocabulario más amplio, donde la clasificación resaltó las similitudes y proporcionó más descriptores. La alta confiabilidad ($R_v = 0,94$) entre estos métodos indica que los datos del consumidor son altamente confiables, repetibles y respalda la validez de los dos métodos utilizados en el estudio. Estos hallazgos confirman que los métodos descriptivos rápidos son adecuados para capturar diferencias entre productos y que pueden ser una herramienta útil para encontrar y comprender las percepciones de los consumidores, y pueden usarse para describir diferentes productos alimentarios y no alimentarios.

Referencias

- Agapito, T. (2004). *Fitomedicina: 1100 plantas medicinales* (Vol. 1). Editorial Isabel. <https://bit.ly/3z95JcM>
- Alcantara, Marcela de, y Freitas-Sá, Daniela De Grandi Castro (2018). Metodologias sensoriais descritivas mais rápidas e versáteis-uma atualidade na ciência sensorial. *Brazilian Journal of Food Technology*, 21: e2016179. Epub January 22, 2018. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.17916>
- Alexi, N., Nanou, E., Lazo, O., Guerrero, L., Grigorakis, K., y Byrnea, D. (2018). Check-All-That-Apply (CATA) with semi-trained assessors: Sensory profiles. *Food Quality and Preference*, 64: 11-20. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2017.10.009>
- Antúñez, L., Ares, G., Giménez, A., y Jaeger, S. (2016). Do individual differences in visual attention to CATA questions affect sensory product characterization? A case study with plain crackers. *Food Quality and Preference*, 48, 185-194. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2015.09.009>
- Bauer, M., Mitchell, S., Elliott, N., y Roberts, J. (2020). Rapid sensory profiling of tennis rackets. In *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings*, 49, 1: 123. <https://doi.org/10.3390/proceedings2020049123>
- Belusso, A. C., Nogueira, B. A., Breda, L. S., y Mitterer-Dalton, M. L. (2016). Check all that apply (CATA) as an instrument for the development of fish products. *Food Science and Technology*, 36(2): 275-281. <http://dx.doi.org/10.1590/1678-457X.0026>
- Bensebia, O., y Allia, K. (2015). Drying and extraction kinetics of rosemary leaves: Experiments and modeling. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 18(1), 99-111. <https://doi.org/10.1080/0972060X.2014.901620>
- Cabana, R. D. C., Arce, P. Y., Poma, M. R., y Vitorro, C. I. (2015). *Evaluación Sensorial de infusiones de "muña-muña" (Clinopodium gilliesii (benth.) Kuntze)*. <https://bit.ly/2RwH7JP>
- Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) (2011). Programa del curso de análisis sensorial de alimentos. España. <https://bit.ly/3cmsMag>
- Da Silva, N. C. B., dos Santos, S. G., da Silva, D. P., Silva, I. L., y Rodovalho, R. S. (2019). Drying kinetics and thermodynamic properties of boldo (*Plectranthus barbatus* Andrews) leaves. *Científica*, 47(1): 01-07. <https://doi.org/10.15361/1984-5529.2019v47n1p1-7>
- Delarue, J., y Lawlor, B. (Eds.) (2014). *Rapid sensory profiling techniques: Applications in new product development and consumer research*. <https://bit.ly/3uZ74iT>
- Esmerino, E., Tavares, E., Thomas, B., Ferraz, J., Silva, H., Pinto, L., Freitas, M., Cruz, A., y Bolini, H. (2017). Consumer-based product characterization using Pivot Profile, Projective Mapping and Check-all-that-apply (CATA): A comparative case with Greek yogurt samples. *Food Research International*, 99(1): 375-384. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.06.001>

- Gallego-Nicasio, V. M. M. B. (2018). *Preparación y cata de aguas, cafés e infusiones. HOTR0209*. IC Editorial. <https://bit.ly/3cmtc0k>
- Gasparin, P. P., Christ, D., y Coelho, S. R. M. (2017). Secagem de folhas Mentha piperita em leito fixo utilizando diferentes temperaturas e velocidades de ar. *Revista Ciência Agronômica*, 48(2): 242-250. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20170028>
- Henrique, N., Deliza, R., y Rosenthal, A. (2015). Consumer Sensory Characterization of Cooked Ham Using the Check-All-That-Apply (CATA) Methodology. *Food Engineering Reviews*, 7(2): 265-273. <https://doi:10.1007/s12393-014-9094-7>
- Kemp, S. E., Hort, J., y Hollowood, T. (Eds.) (2018). *Descriptive analysis in sensory evaluation*. <https://bit.ly/3zk2f7k>
- Liu, J., Bredie, W., Sherman, E., Harberton, J., y Heymann, H. (2018). Comparison of rapid descriptive sensory methodologies: Free-Choice Profiling, Flash Profile and modified Flash Profile. *Food Research International*: 892-900. <https://doi:10.1016/j.foodres.2018.01.062>
- Machado, N., Godoy, T., Barone, B., André, A., Biasoto, A., y Jorge, H. (2019). Sensory profile and check-all-that-apply (cata) as tools for evaluating and characterizing syrah wines aged with oak chips. *Food Research International*, 124: 156-164. <https://doi:10.1016/j.foodres.2018.07.052>
- Magimel, E. P., Windholtz, S., Masneuf-Pomarède, I., y Barbe, J. C. (2020). Sensory characterisation of wines without added sulfites via specific and adapted sensory profile. *Journal of vine and wine sciences*, 54(4): 11-20. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2020.54.4.3566>
- Martins, E. A., Goneli, A. L., Goncalves, A. A., Hartmann Filho, C. P., Siqueira, V. C., y Oba, G. C. (2018). Drying kinetics of blackberry leaves. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 22(8): 570-576. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n8p570-576>
- Meilgarrrd, M. C., Civille, G. V., y Carr, B. T. (2015). *Sensory Evaluation Techniques*. (5th edition). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b19493>
- Mendez-Ancca, S., Cari-Ortiz, E. F., y Condori-Apaza, R. M. (2018). SURIMI de Engraulis ringens Anchoveta aromatizado con extracto muña. Obtención y aceptación de SURIMI de Engraulis ringens Anchoveta aromatizado con extracto de Minthostachys setosa MUÑA. Editorial Académica Española. ISBN- 978-620-2-10428-9.
- Montanuci, F. D., Marques, D. R., y Monteiro, A. R. G. (2015). Flash Profile for rapid descriptive analysis in sensory characterization of passion fruit juice. *Acta Scientiarum. Technology*, 37(3): 337-344. <https://bit.ly/2Sh2Ju7>
- Pramudya, R., y Seo, H. S. (2018). Using Check-All-That-Apply (CATA) method for determining product temperature-dependent sensory-attribute variations: A case study of cooked rice. *Food Research International*, 105: 724-732. <https://doi:10.1016/j.foodres.2017.11.075>
- Salaverry-García, O. (2005). La complejidad de lo simple: plantas medicinales y sociedad moderna. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 22(4): 245-246. <https://bit.ly/34TYA25>
- Silva-Paz, R., Huaman-Llaja, A., Hurtado de Mendoza-Merino, K., Bravo-Aranibar, y Silva- Baigorria, S. (2016). Caracterización sensorial de salsa a base de hongos (*Pleurotus ostreatus*) mediante la técnica Perfil Flash. *Revista Venezolana de Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 7(1): 001-016. <https://bit.ly/3cls9xu>
- Tarancón, P., Salvador, A., Sanz, T., Fiszman, S., y Tárrega, A. (2015). Use of healthier fats in biscuits (olive and sunflower oil): changing sensory features and their relation with consumers' liking. *Food Research International*, 69: 91-96. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.12.013>
- Tarancón, P., Tárrega, A., Aleza, P., y Besada, C. (2020). Consumer Description by Check-All-That-Apply Questions (CATA) of the Sensory Profiles of Commercial and New Mandarins. Identification of Preference Patterns and Drivers of Liking. *Foods*, 9(4): 468. <https://doi:10.3390/foods9040468>
- Torres, F. R., Esmerino, E. A., Carr, B. T., Ferrão, L. L., Granato, D., Pimentel, T. C., Bolini, H. M. A., Freitas, M. Q. y Cruz, A. G. (2017). Rapid consumer-based sensory characterization of requeijão cremoso, a spreadable processed cheese: Performance of new statistical approaches to evaluate check-

- all-that-apply data. *Journal of Dairy Science*, 100(8): 6100-6110. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-12516>
- Valera, P., y Ares, G. (Eds.). (2014). *Novel Techniques in Sensory Characterization and Consumer Profiling*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b16853>
- Vidal, L., Antúnez, L., Ares, G., Cuffia, F., Lee, P.-Y., Le Blond, M., y Jaeger, S. (2019). Sensory product characterisations based on check-all-that-apply questions: Further insights on how the static (CATA) and dynamic (TCATA) approaches perform. *Food Research International*, 125. <https://doi:10.1016/j.foodres.2019.108510>

Emulsiones gelificadas enriquecidas con harina de garbanzo como potencial sustituto de grasa animal

(Gelled emulsions enriched with chickpea flour as a potential substitute for animal fat)

Melisa, G. Britez¹, Fabiana A. Rolhaiser², Carina L. Fernández³, Ricardo A. Fogar⁴, Mara, C. Romero⁵

Resumen

El objetivo de este trabajo fue desarrollar emulsiones gelificadas de aceite en agua (O/W), formuladas con aceite de lino y harina de garbanzo con adecuadas propiedades estructurales y tecnológicas para ser empleadas como sustitutos de grasa animal. Para esto, se elaboraron dos formulaciones, una sin antioxidante y la otra con el antioxidante sintético más empleado en la industria. La harina de garbanzo y la gelatina se hidrataron durante 3 horas con agitación a 3000 r. p. m., luego se calentaron durante 30 minutos a 90 °C, se enfriaron a 30 °C y se procesaron nuevamente a 3000 r. p. m. durante 30 segundos, mientras la fase oleosa se incorporó lentamente con el agente emulsionante. Las mezclas se colocaron en contenedores, se dejaron estabilizar a 25 °C durante 30 minutos y luego se refrigeraron por 24 horas. Se determinó la sinéresis, estabilidad térmica, oxidación lipídica, y los espectros infrarrojos de las muestras. Se pueden observar diferencias significativas para la oxidación de lípidos ($p < 0.05$), sin embargo, la sinéresis y estabilidad térmica no mostraron diferencias ($p > 0.05$), evidenciando las emulsiones gran capacidad de retención de agua y grasa, lo cual puede atribuirse a la estructura proteica resultante de calentar la emulsión para dar lugar a la gelificación. Las emulsiones gelificadas obtenidas presentan adecuadas propiedades estructurales y tecnológicas, sin exudación de fluidos, con valores de oxidación por debajo del límite de detección de 1.59 mg de MDA / kg de muestra. Dadas las características de la emulsión obtenida se abre un nuevo campo de la aplicación de estrategias tecnológicas para la obtención de sustitutos de grasa animal como ingrediente graso saludable en los productos cárnicos.

Palabras clave

Sustitutos de grasa; harina libre de gluten; estabilidad térmica; sinéresis; dureza.

Abstract

The aim of the study was to develop gelled oil-in-water (O/W) emulsions, formulated with flax oil and chickpea flour with adequate structural and technological properties to be used as substitutes for animal fat. For this, two formulations were made, one without antioxidant and the other with the most widely used synthetic antioxidant in the industry. The chickpea flour and gelatin were hydrated for 3 hours with stirring at 3000 r. p. m., then they were heated for 30 minutes at 90 °C, cooled to 30 °C and processed again at 3000 r. p. m. for 30 seconds, while the oil phase was slowly incorporated with the emulsifying agent. The mixtures were placed in containers, allowed to stabilize at 25 °C for 30 minutes and then refrigerated for 24 hours. The syneresis, thermal stability, lipid oxidation, and infrared spectra of the samples were determined. Some significant differences can be observed for lipid oxidation ($p < 0.05$), however, syneresis and thermal stability did not show differences ($p > 0.05$), with emulsions showing great water and fat retention capacity. This can be attributed to the protein structure resulting from heating the emulsion to cause gelation. The gelled emulsions obtained have adequate structural and technological properties, with lipid oxidation values under limit of detection of 1.59 mg MDA / kg sample. Given the characteristics of the emulsion obtained, a new field of application of technological strategies opens up to obtain animal fat substitutes as a healthy fat ingredient in meat products.

Keywords

Fat substitute, gluten free flour; thermal stability; syneresis; hardness.

- 1 Universidad Nacional Del Chaco Austral, Chaco, Argentina. [melisabritez@uncaus.edu.ar, https://orcid.org/0000-0002-0282-0059]
- 2 Universidad Nacional del Chaco Austral / INIPTA-CONICET. [fabianarolhai-ser@uncaus.edu.ar, https://orcid.org/0000-0001-7493-8550]
- 3 Universidad Nacional Del Chaco Austral, Chaco, Argentina. [fernandezcarina@uncaus.edu.ar, https://orcid.org/0000-0003-2326-4589]
- 4 Universidad Nacional Del Chaco Austral, Chaco, Argentina. [rfogar@uncaus.edu.ar, https://orcid.org/0000-0002-4990-7012]
- 5 Universidad Nacional del Chaco Austral / INIPTA-CONICET. [mara@uncaus.edu.ar, https://orcid.org/0000-0001-9624-9051]

1. Introducción

La grasa de los alimentos, como la utilizada en los productos cárnicos cumple con varias funciones complejas y que dependen del tipo de producto a elaborar. Por ejemplo, la grasa influye en la textura, lo que se evidencia cuando el producto se vuelve más duro o gomoso debido a una disminución en su contenido. También afecta al color (aporta brillo, opacidad o contribuye al pardeamiento), contribuye al sabor (como fuente o como portador de compuestos volátiles), afecta la apariencia, sensación en la boca, sabor, aroma y jugosidad de los productos, incluso transfiriere calor al freír y proporciona saciedad (Pehlivanoglu, Demirci, Toker, Konar, Karasu y Sagdic, 2018).

Sin embargo, la grasa sólida contiene una gran cantidad de ácidos grasos saturados y trans, cuyos efectos negativos, productos de la ingesta excesiva, pueden resultar en una serie de enfermedades crónicas, como obesidad, diabetes y enfermedades cardiovasculares, las que han sido cada vez más reconocidas por consumidores (Mozaffarian y Clarke, 2009). Es por ello que las recomendaciones nutricionales sugieren desplazar su consumo a grasas insaturadas (Ashkar, Laufer, Rosen-Kligvasser, et al., 2019). Debido a estos cambios en la alimentación, la industria alimentaria recurre a diferentes estrategias para la mejora del perfil de lípidos en los alimentos, a través de la incorporación de aceites saludables, como aceite de soja, oliva, o linaza, entre otros, siendo este proceso cuidadosamente controlado para no producir un impacto negativo en las características organolépticas finales del producto (Vieira, McClements y Decker, 2015).

La estructuración de los aceites en matrices sólidas como las emulsiones gelificadas permite desarrollar sustitutos de grasa con características texturales similares a la grasa presente en los productos cárnicos, mejorando la retención de la misma en el producto. La etapa inicial en la formulación de una emulsión gelificada, generalmente implica la obtención de una emulsión estabilizada con proteínas. Luego se pueden incorporar hidrocoloides u otros ingredientes (proteínas, polisacáridos, tensioactivo, etc.) después de la formación de la emulsión. A continuación, la emulsión se convierte en un gel de emulsión, ya sea agregando las gotas de emulsión o gelificando la fase acuosa debido a las proteínas adicionadas. El estado estructural de una emulsión gelificada de aceite en agua (O/W) se ha descrito como una red compuesta basada en una combinación de gotas de emulsión agregadas y biopolímero reticulado moléculas, este estado estructural real determina sus propiedades texturales (Dickinson, 2012; 2013). Por lo tanto, las emulsiones gelificadas, son un material coloidal complejo donde coexisten estructuras de emulsión y gel, ofreciendo interesantes posibilidades de uso como ingredientes alimentarios con nuevas propiedades funcionales y muchas aplicaciones industriales, pudiendo incorporar además harinas en la fase acuosa (Dickinson, 2011; Mao y Miao, 2015; McClements, 2012; Poyato, Ansorena, Berasategi, Navarro-Blasco y Astiasarán, 2014; Pintado, Ruiz-Capillas, Jiménez-Colmenero, Carmona y Herrero, 2015).

Por otra parte, en cuanto al uso de harinas en la industria cárnica, la más utilizada es la harina de trigo. Sin embargo, el uso de la harina de trigo hace inaccesible los productos cárnicos a un sector de la población como son los enfermos celíacos, porque contienen gluten. En el mercado se encuentran disponibles distintas harinas libres de gluten, que están ganando relevancia como alimentos funcionales, ya que poseen hidratos de carbono de bajo índice glucémico, fibras, proteínas de alto valor biológico, ácidos grasos n3 y n6, vitaminas y minerales. Las características de estas harinas hacen que en los últimos años se hayan incrementado las investigaciones para el desarrollo de nuevos productos cárnicos, de forma tal que se pueda

hacer atractivo su consumo, como lo indican las evaluaciones sensoriales de los mismos en distintos estudios (Romero, Fogar, Rolhaiser, Clavero, Romero, y Judis, 2018; Shariati-levari, Ryland, Edel, Nicholson, Suh y Alian, 2016; Mokni Ghribi, Gafsi, Blecker, Danthine, Attia y Besbes, 2015). Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue desarrollar emulsiones gelificadas de aceite en agua (O/W), formuladas con aceite de lino y harina de garbanzo con adecuadas propiedades estructurales y tecnológicas para ser usadas como reemplazo de la grasa animal en la fabricación de productos cárnicos de alto contenido graso.

2. Metodología

2.1 Materia prima

Se utilizó harina de garbanzo (HGb), aceite de lino (Sol Azteca-SIN TACC), antioxidante butilhidroxianizol (BHA, Sigma-Aldrich), gelatina sin sabor (ARCOR®), agua bidestilada, sorbato de potasio y tween 80 (polisorbato). Se ensayaron distintas formulaciones para determinar la mínima concentración de gelatina que permite la gelificación; del mismo modo, se procedió con la HGb, encontrándose la mínima cantidad que permite un gel de estructura sólida. Una vez determinadas las concentraciones de las mezclas, se elaboraron dos formulaciones con las cantidades que se indican a continuación: 2 g de gelatina, 10 g de HGb, 40 g de aceite de lino, 45 g de agua. La diferencia entre ambas es que una fue adicionada con BHA al 0.01 %, denominándose emulsión gelificada control (EGC), y emulsión gelificada con BHA (EGBHA).

2.2 Elaboración de emulsiones gelificadas

Se preparó una mezcla enriquecida con harina de garbanzo empleando proteína de gelatina como agente gelificante, la cual se hidrató con agua destilada durante 3 horas con agitación a 3000 r. p. m., utilizando un homogeneizador, según el procedimiento propuesto por Pintado y col (2015). Transcurrido el tiempo de rehidratación las muestras se procesaron con minipimer a 3000 r. p. m., se llevaron a calentamiento durante 30 minutos a 90 °C (De Souza Paglarini, de Figueiredo, Honório, Mokarzel, Vidal, et al., 2019), se enfriaron a 30 °C y se procesaron nuevamente con minipimer a 3000 r. p. m. durante 30 segundos, mientras la fase oleosa se incorporó lentamente con el agente emulsionante tripolifosfato de sodio 0.05 %. Una vez adicionado todo el aceite la mezcla se continuó procesando durante 3 minutos a velocidad de 3000 r. p. m.

Luego, la mezcla se colocó en un contenedor bajo presión para evitar la formación de burbujas, se dejó estabilizar a 25 °C durante 30 minutos. Finalmente se dejó en reposo por 24 h en refrigeración, y se realizaron los ensayos previstos.

2.3 Sinéresis, estabilidad térmica y pH

La sinéresis o pérdida de agua durante almacenamiento de las emulsiones afectadas por el enfriamiento se determinaron por diferencia de peso (%) entre muestras iniciales y almacenadas en intervalos de tiempo durante 7 días (por duplicado) Pintado et al. (2015) y Liu, Feng, Wang, Wang, Sun, et al. (2018). Para esto se pesó cada una de las muestras en placas de Petri almacenadas y refrigeradas, una vez cumplido el tiempo de almacenamiento se procedió a remover el agua condensada en las paredes y nuevamente se pesó cada muestra, lo cual se pue-

de observar en la Ecuación 1. Donde H_0 es el contenido de agua inicial en las muestras (%), P_0 es el peso inicial de cada muestra (g) y P_1 el peso (g) al final del almacenamiento.

$$\text{Sinéresis (S\%)} = \frac{P_0 - P_1}{H_0} \times 100 \quad (1)$$

La estabilidad térmica se determinó en términos de las propiedades de unión de agua y aceite de las muestras, según lo descrito por Herrero, Carmona, Jiménez-Colmenero y Ruíz Capillas, (2014). Las muestras se colocaron en tubos de ensayo los que se calentaron en un baño a 80 °C de agua durante 30 minutos. Luego, los tubos se colocaron en un plato boca abajo (durante 60 minutos) para liberar fluidos, el procedimiento se realizó por duplicado para cada muestra. La estabilidad de las muestras se expresó como liberación total de fluidos (LTF), y se expresó como % del peso de muestra inicial.

El pH se determinó utilizando un pH-metro de mesa o de punción a 25 °C por duplicado, para este procedimiento se introdujo en cada muestra el electrodo y una vez estabilizado el sistema se procedió a tomar lectura.

2.4 Color

Las determinaciones de color se evaluaron con un espectrofotómetro Evolution 600 IV-Vis (equipado con esfera integradora y software VISIONlite colorCalc.) Estas determinaciones de los valores L^* (luminosidad), a^* (rojeza) y b^* (amarillez) se realizaron en secciones transversales de la muestra.

2.5 Oxidación lipídica

Para determinar la oxidación lipídica se utilizó el método TBARS, según lo propuesto por Ospina-E, Rojano, Ochoa, Pérez-Álvarez y Fernández-López, (2014), en vasos de precipitados se colocaron 5 g de cada muestra, se adicionó 15 ml de agua, agregando 10 μ L de butilhidroxianisol (BHA) al 3.6 % p / V, la mezcla se homogenizó para poder precipitar a la proteína en un Ultra-turrax ® a 20 000 r. p. m. durante 90 segundos (IKA Inc., Germany). Luego se extrajo 1 ml de las muestras, se llevaron tubos de ensayos donde se adicionaron 2 ml de reactivo de TBA (ácido 2-tiobarbitúrico -TBA- en solución de ácido tricloroacético -TCA-: TBA 20 mm en 100 ml de solución acuosa de TCA al 15 % p / V), y se siguió agitando. Después se llevó a baño maría hirviendo a 100 °C durante 15 minutos. Se retiró, se enfrió bajo canilla y se llevó a centrifugación a 2500 r. p. m. durante 15 minutos. La absorbancia se mido utilizando un espectrofotómetro Evolution 600 UV-Vis y los resultados se expresaron como mg MAD/kg muestra. El ensayo se realizó por triplicado para cada muestra.

2.6 Textura

La prueba de penetración de las emulsiones gelificadas se realizó empleando un analizador de textura Texture Analyzer CT V1.4 Bld 17 Brookfield Engineering Labs, utilizándose el software Ttexture ProC3 (USA). El análisis fue realizado utilizando un cilindro de acero inoxidable de 4 mm de diámetro a una velocidad de penetración de 0.8 mm/s y una distancia máxima de penetración de 10 mm.

2.7 Espectroscopia IR

Los espectros infrarrojos de cada muestra se registraron, utilizando el espectrómetro FTIR (IS5, Nicolet, USA). Se analizaron los espectros IR en el rango de 4000-650 cm^{-1} para evaluar las estructuras de las mezclas, como así también las modificaciones que tuvieron lugar después de la mezcla y/o calentamiento de cada uno de los sistemas a ensayar, lo cual se realizó de acuerdo a (Pintado et al., 2015). Las mediciones de las muestras se realizaron a temperatura ambiente, colocadas en la superficie del cristal y levemente prensado con un émbolo de punta plana.

3. Resultados y Discusión

La *figura 1*, muestra el aspecto las emulsiones gelificadas (EG) obtenidas con harina de garbanzo (HGb), aceite de lino, agua destilada y gelatina (G) como agente gelificante, con las concentraciones mínimas de gelificación. El color de las muestras es similar al de la harina de garbanzo, esto es esencial en el desarrollo de sustitutos de grasa ya que es uno de los factores determinantes en la elección de alimentos por parte del consumidor.

Figura 1. Aspecto de las emulsiones gelificadas con harina de garbanzo



La *tabla 1* informa los valores hallados para los distintos parámetros analizados. En ella se puede observar que el pH y la oxidación inicial de lípidos en las muestras presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$). Debido que la harina de garbanzo contiene un pH levemente ácido (pH 2-4), pudiendo afectar el valor de este parámetro en las emulsiones gelificadas, que como se puede observar fue levemente ácido. Estos valores de pH son menores que lo reportado por otros autores para emulsiones gelificadas con proteína de soja o harina de chía (Jiménez-Colmenero, Herrero, Pintado, Solas y Ruiz-Capillas, 2010; Muñoz-González, Merino-Álvarez, Salvador, Pintado, Ruiz-Capillas, Jiménez-Colmenero y Herrero, 2019). Las EG obtenidas podrían ser empleadas en productos cárnicos, aunque debe monitorearse lo que sucede con este parámetro durante el almacenamiento refrigerado, ya que Pintado et al. (2015) encontraron que el pH de emulsiones gelificadas con harina de chía desciende durante el almacenamiento, lo que podría influir en las características de los productos. Asimismo, se puede observar que los valores de oxidación se encontraron por debajo del límite de detección de 1,59 mg de MDA / kg de muestra, el cual, de acuerdo con Ozer y Sariçoban (2010) es el valor límite a partir del cual podrían presentarse efectos negativos en la salud del consumidor. La oxidación de lípidos determina el potencial uso de los sustitutos como ingredientes en productos ricos en grasas, más aún si se utilizan aceites insaturados (Yilmaz y Ögütcü 2015; Hwang, Phaner, Winkler-Moser y Liu, 2018).

Tabla 1. pH, color, TBARS, sinéresis y textura de las emulsiones gelificadas adicionadas con harina de garbanzo

Determinaciones	Muestras	
	C	BHA
pH	5.09±0.02 ^a	5.51±0.003 ^b
TBARS (mg MAD/kg Muestra)	0.78±0.01 ^b	0.70±0.09 ^a
Sinéresis	1.07±0.42 ^a	0.89±0.42 ^a
L*	79.65±1.06 ^a	81.25±0.07 ^a
a*	-0.7±0.26 ^a	-0.90±0.29 ^a
b*	17.36±1.06 ^a	18.5±0.34 ^a
Dureza (N)	0.142±0.00 ^b	0.140±0.01 ^a
Adhesividad (mj)	0.86±0.14 ^a	0.76±0.00 ^a
Fracturabilidad (N)	0.07±0.01 ^a	0.08±0.00 ^a

^{A,b} Letras diferentes en la misma fila, indican diferencias significativas.

Los parámetros de color obtenidos se encuentran comprendidos dentro de los informados por Pintado et al. (2015) para EG de harina de chíá con diferentes agentes gelificantes en frío y son mayores que los reportados por Muñoz-González et al. (2019). Además, los valores de a* y b* son cercanos a lo informado por Kaur y Singh, (2005) en harinas de garbanzo provenientes de distintos cultivares, exhibiendo también tintes azules, verdes y amarillos, se debe destacar que los pigmentos de color de las harinas dependen del origen biológico de la planta. En cuanto a su incorporación a productos cárnicos, se ha informado que la adición de análogos de grasas con gel konjac a salchichas influyen en la percepción del color (Jiménez-Colmenero, Cofrades, Herrero, Fernández-Martín, Rodríguez-Salas y Ruiz-Capillas, 2012). Por lo tanto, es necesario que el color de los sustitutos de grasa sea similar a los de la carne y grasa empleada, generalmente, en la elaboración de los productos en el cual se incorporarán.

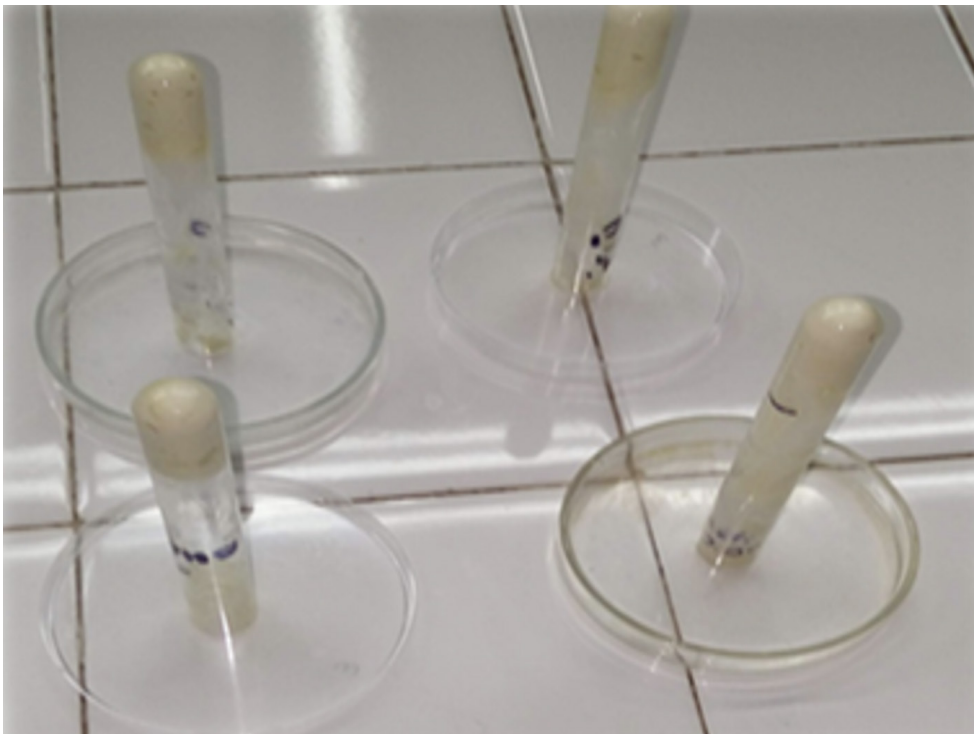
Las propiedades texturales de las emulsiones gelificadas están relacionadas con la estructura tridimensional de la red gelificada, la cual es una red compuesta formada por una combinación de gotas de emulsión agregadas y macromoléculas reticuladas (Dickinson, 2013), por lo que conocer su estructura es relevante para el potencial uso de las EG en matrices alimentarias. En lo que respecta al análisis de textura, la muestra C presentó una pequeña mayor dureza que la muestra con BHA ($p < 0.05$), no observándose diferencias significativas en la adhesividad y fracturabilidad de las muestras. En las emulsiones gelificadas, donde la estructura principal es un gel de partículas agregadas, las propiedades texturales están determinadas por las interacciones entre las gotas de aceite y proteínas o hidratos de carbono presentes en el sistema los que generalmente son empleados como gelificante. En este sentido, el uso de la espectroscopía ATR-FTIR puede proporcionar información de la red estructural basada en una comprensión de las interacciones de los ingredientes y de las gotitas de emulsión o del tamaño de las gotitas de emulsión, que puede arrojar luz sobre el diferente comportamiento textural de la O/W gelificada desarrollada en este estudio.

En lo que respecta a la sinéresis y estabilidad térmica *figura 2*, se observó que ninguna de las emulsiones gelificadas liberó agua o aceite durante el calentamiento ($p > 0.05$), esto de-

muestra su gran capacidad de retención de fluidos, lo que resulta de gran importancia para su empleo como sustituto de grasa animal en productos cárnicos especialmente cocidos. Estas propiedades tecnológicas pueden ser atribuidas a los diferentes compuestos como proteínas, carbohidratos (principalmente los que componen el mucílago) y fibra de la harina de garbanzo que poseen alta capacidad de retención de agua, capacidad de absorción de agua y suficiente actividad emulsionante para una alta estabilidad de la emulsión (Aguilar-Raymundo y Velez-Ruiz, 2013). Estudios previos han informado sobre las propiedades emulsionantes y espumantes de la harina de garbanzo, destacando que la hidrólisis enzimática de las proteínas del garbanzo favorece la formación de emulsiones (Félix, Isurralde, Romero y Guerrero, 2018; Félix, Romero, Sánchez y Guerrero, 2019; Mokni Ghribi, et al., 2015; Félix, Cermeno y Fitzgerald, 2020). Además, estos resultados coinciden con otros autores que reportaron una alta estabilidad de emulsiones gelificadas elaboradas con proteínas de soja, o harinas de chía estabilizadas con distintos agentes gelificantes (Pintado et al., 2015; Delgado-Pando, Cofrades, Ruiz-Capillas, Teresa Solas y Jiménez-Colmenero, 2010; Sato, Moraes, y Cunha, 2014).

La estabilidad de un sistema gelificado es en gran medida dependiente de las interacciones moleculares entre las sustancias que componen el sistema (Herrero, Ruiz-Capillas, Pintado, Carmona y Jiménez-Colmenero, 2018). En el caso de sistemas compuestos por lípidos proteínas, carbohidratos y agua, las interacciones entre cadenas lipídicas y proteicas pueden evaluarse mediante los cambios en las regiones de estiramiento del grupo $-OH$ presente en agua y carbohidratos ($3000-3600\text{ cm}^{-1}$) y de los grupos $-CH$ y CH_2 ($2800-3000\text{ cm}^{-1}$), mientras que los cambios en las bandas de absorción de Amida I y II ($1500-1700\text{ cm}^{-1}$) y de residuos de triptófano ($1100-1330\text{ cm}^{-1}$) son de utilidad para evaluar los cambios en la estructura proteica resultantes de calentar la emulsión para dar lugar a la gelificación.

Figura 2. Estabilidad térmica de las emulsiones gelificadas



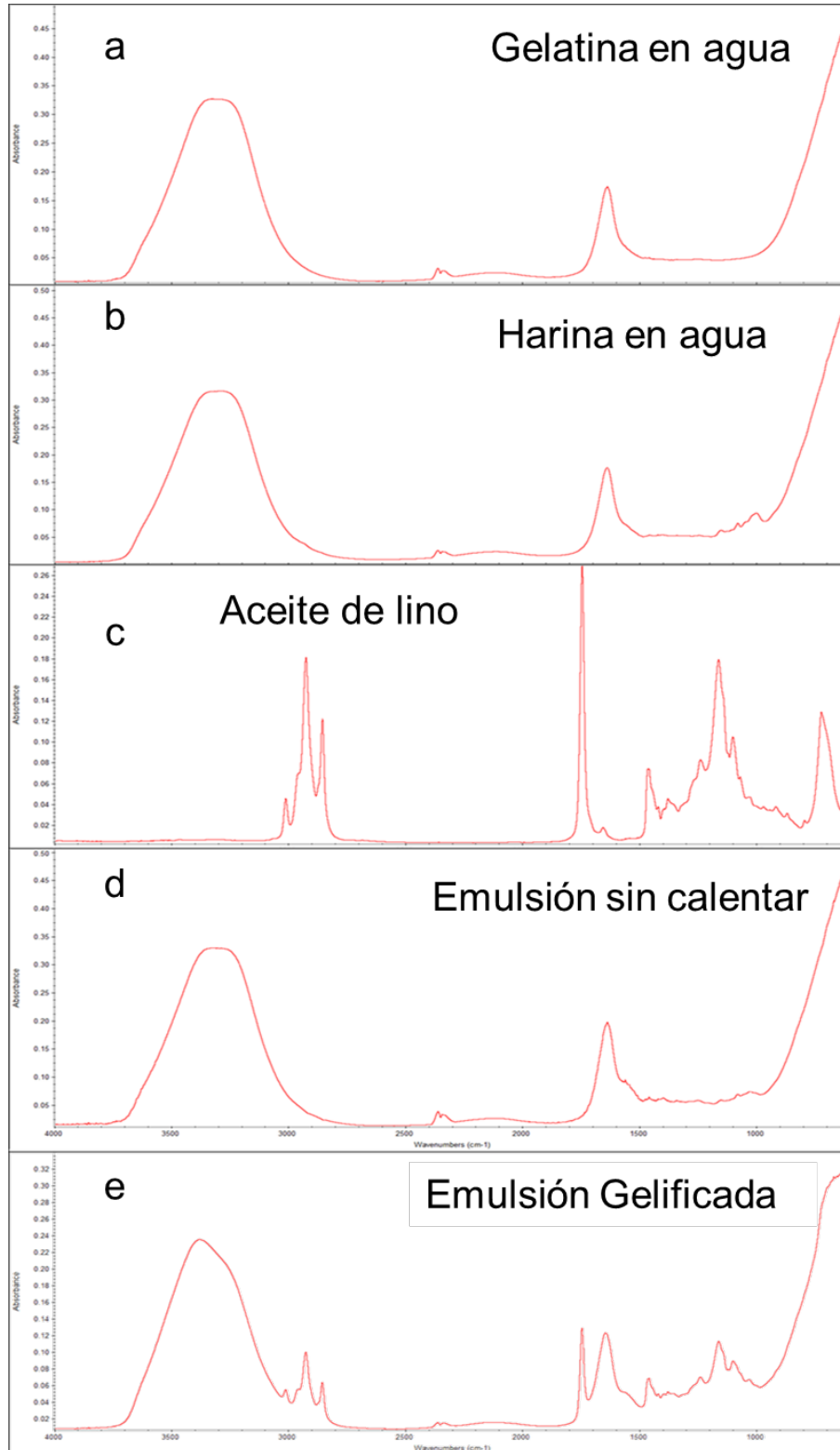
La estabilidad térmica de la emulsión gelificada en estudio puede atribuirse a un tamaño apropiado de gotas de aceite incorporadas a la red del gel, lo que impide la formación de agregados y consecuente desestabilización, evidenciado por el estrechamiento de la banda en la región de $3600-2800\text{ cm}^{-1}$ (Pintado, Herrero, Jiménez-Colmenero y Ruiz-Capillas, 2016). En las partes a y b de la *figura 3* se muestran los espectros IR de gelatina en agua y harina de garbanzo en agua, respectivamente, mientras que, al comparar las partes c, d y e, de dicha figura, se infiere un cambio en la polaridad del medio debido a la asociación entre cadenas lipídicas y proteicas como resultado del calentamiento de la mezcla, lo que se evidencia al registrarse una disminución de la intensidad de las bandas en la región de $2950-2800\text{ cm}^{-1}$ y de la banda característica de aceites puros en la región de $1800-1700\text{ cm}^{-1}$ (Herrero et al., 2018). Del análisis de los espectros de IR mostrados en la *figura 3* puede inferirse que la harina de garbanzo tiene efecto nulo en la estabilidad de la emulsión gelificada, es decir, la estabilidad del gel puede considerarse exclusivamente dependiente de la desnaturalización de las proteínas de la gelatina por acción del calentamiento, lo que resulta en una mayor exposición de sus grupos hidrofóbicos, según los cambios registrados en la región de $1330-1100\text{ cm}^{-1}$, lo que permite, a la vez, una mayor interacción con las cadenas lipídicas del aceite (Usoltsev, Sitnikova, Kajava y Uspenskaya, 2019).

5. Conclusiones y recomendaciones

El presente trabajo manifiesta la potencialidad de la elaboración de emulsiones gelificadas (O/W), que contienen una variedad de compuestos bioactivos como aceite de lino y harina de garbanzo, elaborados con un gelificante rico en proteínas como la gelatina, resultando en productos con adecuadas propiedades estructurales y tecnológicas, los que podrían emplearse como ingrediente graso saludable en los productos cárnicos. La incorporación de harina de garbanzo en estos productos, además ofrece nuevas oportunidades en el desarrollo de productos más sanos, ya que proporciona una gran variedad de compuestos bioactivos como ácidos $\omega 3$, proteínas de alto valor biológico, antioxidantes, fibra dietética, etc.

Se observó que el pH y la oxidación inicial de lípidos en las muestras presentaron diferencias significativas al momento del estudio. De acuerdo con la sinéresis y estabilidad térmica se destacó que ninguna de las emulsiones liberó agua o grasa (aceite) durante el calentamiento. Respecto al color de las muestras, se observó que no existen diferencias significativas entre los distintos parámetros evaluados para ambas muestras y por último en lo que refiere al análisis de textura, la muestra C presentó una pequeña mayor dureza que la muestra con BHA ($p < 0.05$), no observándose diferencias significativas en la adhesividad y fracturabilidad de las muestras. La espectroscopia IR proporciona información sobre la estructura real de la red de la emulsión gelificada O/W en particular de las interacciones de lípidos asociadas con su presencia en la red de la EG, también ayuda a entender las características de textura, en particular la dureza, parámetro condicionante para el uso de estas emulsiones gelificadas como sustitutos de grasa animal en la formulación de productos cárnicos más saludables.

Figura 3. Espectros ATR-FTIR en los 2960-2830 cm^{-1} , correspondiente a la región de aceite de lino puro (c) y emulsión gelificada de aceite de oliva en agua (e), adicionados con harina de garbanzo



Referencias

- Aguilar-Raymundo, V. G., y Vélez-Ruiz, J. F. (2013). Propiedades nutricionales y funcionales del garbanzo (*Cicer arietinum* L). *Temas Selectos de Ingeniería en Alimentos*, 7(2), 25-34. <https://tsia.udlap.mx/propiedades-nutricionales-y-funcionales-del-garbanzo-cicer-arietinum-l/>
- Ashkar A, Laufer S, Rosen-Kligvasser J, et al. (2019) Impact of different oil gelators and oleogelation mechanisms on digestive lipolysis of canola oil oleogels. *Food Hydrocolloids*, 97,105218. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105218>
- Delgado-Pando, G., Cofrades, S., Ruiz-Capillas, C., Teresa Solas, M. y Jiménez-Colmenero, F. (2010). Healthier lipid combination oil-in-water emulsions prepared with various protein systems: An approach for development of functional meat products. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 112(7), 791–801. <https://doi.org/10.1002/ejlt.200900234>
- De Souza Paglarini, C., de Figueiredo, G., Honório, A. R., Mokarzel, L., Vidal, V. A., Ribeiro, A. P. B., Lopes Cunha, R. y Rodrigues Pollonio, M. A. (2019). Functional emulsion gels as pork back fat replacers in bologna sausage. *Food structure*, 81(5), 1230-1242, <https://doi.org/10.1016/j.foostr.2019.100105>
- Dickinson, E. (2011). Double emulsions stabilized by food biopolymers. *Food Biophysics* 6(1), 1-11. <http://dx.doi.org/10.1007/s11483-010-9188-6>
- Dickinson, E. (2012). Emulsion gels: The structuring of soft solids with protein stabilized oil droplets. *Food Hydrocolloids*, 28, 224–241. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.12.017>
- Dickinson, E. (2013). Stabilising emulsion-based colloidal structures with mixed food ingredients. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93, 710–721. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6013>
- Félix, M., Cermeno, M. y Fitzgerald, R. J. (2020). Influence of hydrolysis on the bioactive properties and stability of chickpea protein based O/W emulsions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c02427>
- Félix, M., Isurralde, N., Romero, A. y Guerrero, A. (2018). Influence of pH value on microstructure of oil-in-water emulsions stabilized by chickpea protein flour. *Food Science and Technology International*, 24(7), 555-563. <https://doi.org/10.1177/1082013218774707>
- Felix, M., Romero, A., Sanchez, C.C. y Guerrero, A. (2019). Modelling the non-linear interfacial shear rheology behaviour of chickpea protein-adsorbed complex oil/water layers. *Applied Surface Science*, 469, 792-803. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.11.074>
- Herrero, A. M., Carmona, P., Jiménez-Colmenero, F., Ruiz-Capillas, C. (2014). Polysaccharide gels as oil bulking agents: Technological and structural properties. *Food Hydrocolloids* 36, 374-381. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.08.00>
- Herrero, A. M., Ruiz-Capillas, C., Pintado, T., Carmona, P. y Jiménez-Colmenero, F. (2018). Elucidation of lipid structural characteristics of chia oil emulsion gels by Raman spectroscopy and their relationship with technological properties. *Food Hydrocollids*. 77, 212-219. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.09.036>
- Hwang, H. S., Phaner, M., Winkler-Moser, J. K. y Liu, S. X. (2018). Oxidation of Fish Oil Oleogels Formed by Natural Waxes in Comparison With Bulk Oil. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 120(5),1700378. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201700378>
- Jiménez-Colmenero, F., Herrero, A., Pintado, T., Solas, M. T., Ruiz-Capillas, C. (2010) Influence of emulsified olive oil stabilizing system used for pork backfat replacement in frankfurters. *Food Research International*, 43(8), 2068–2076. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.06.010>
- Jiménez-Colmenero, F., Cofrades, S., Herrero, A.M., Fernández-Martín, F., Rodríguez-Salas, L. y Ruiz-Capillas, C. (2012). Konjac gel fat analogue for use in meat products: Comparison with pork fats. *Food Hydrocolloids*, 26, 63-72. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.04.007>
- Kaur, M. y Singh, N. (2005). Studies on functional, thermal and pasting properties of flours from different chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivars. *Food Chemistry* 91 403–411. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.06.015>

- Liu, W.-Y., Feng, M.-Q., Wang, M., Wang, P., Sun, J., Xu, X.-L. y Zhou, G.H. (2018). Influence of flaxseed gum and NaCl concentrations on the stability of oil-in-water emulsions. *Food Hydrocolloids*, 79, 371-381. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.01.010>
- Mao, L.K., y Miao, S. (2015). Structuring food emulsions to improve nutrient delivery during digestion. *Food Engineering Reviews*, 7(4), 439-451. <http://dx.doi.org/10.1007/s12393-015-9108-0>
- McClements, D. J. (2012). Advances in fabrication of emulsions with enhanced functionality using structural design principles. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 17(5), 235-245. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cocis.2012.06.002>
- Mokni Ghribi, A., Maklouf Gafsi, I., Sila, A., Blecker, C., Danthine, S., Attia, H., Bougatef, A., Besbes, S. (2015). Effects of enzymatic hydrolysis on conformational and functional properties of chickpea protein isolate. *Food Chemistry*, 187, 322-330. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.04.109>
- Mozaffarani, D. y Clarke, R. (2009). Quantitative effects on cardiovascular risk factors and coronary heart disease risk of replacing partially hydrogenated vegetable oils with other fats and oils. *European Journal of Clinical Nutrition*, 63(2), 22-S33. <https://doi.org/10.1038/sj.ejcn.1602976>
- Muñoz-González, I., Merino-Álvarez, E., Salvador, M., Pintado, T., Ruiz-Capillas, C., Jiménez-Colmenero, F. y Herrero, A.M. (2019). Chia (*Salvia hispanica* L.) a Promising Alternative for Conventional and Gelled Emulsions: Technological and Lipid Structural Characteristics. *Gels*, 5(19), 1-12. <https://doi.org/10.3390/gels5020019>
- Ospina-E, J. C., Rojnano, B., Ochoa, O., Pérez-Álvarez, J.A. y Fernández-López, J. (2014). Development of frankfurter-type sausages with healthier lipid formulation and study of its nutritional, sensory and stability properties. *European Journal of Lipid Science and Technology*, <https://doi.org/10.1002/ejlt.201400157>
- Ozer, O. y Sariçoban, C. (2010). The Effects of Butylated Hydroxyanisole, Ascorbic Acid, and α -Tocopherol on Some Quality Characteristics of Mechanically Deboned Chicken Patty during Freeze Storage. *Czech Journal of Food Science*, 28(2), 150-160. <https://doi.org/10.17221/160/2009-CJFS>
- Pehlivanoglu, H., Demirci, M., Toker, O. S., Konar, N., Karasu, S., y Sagdic, O. (2018). Oleogels, a promising structured oil for decreasing saturated fatty acid concentrations: Production and food-based applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58,1-12. <https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1256866>
- Pintado, T., Ruiz-Capillas, C., Jiménez-Colmenero, F., Carmona, P. y Herrero, A.M. (2015). Oil-in-water emulsion gels stabilized with chia (*Salvia hispanica* L.) and cold gelling agents: Technological and infrared spectroscopic characterization. *Food Chemistry*, 185, 470-478. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.04.024>
- Pintado, T., Herrero, A. M., Jiménez-Colmenero, F. y Ruiz-Capillas, C. (2016). Strategies for incorporation of chia (*Salvia hispanica* L.) in frankfurters as a health-promoting ingredient. *Meat Science* 114, 75-84. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2015.12.009>
- Poyato C, Ansorena D, Berasategi I, Navarro-Blasco, I. y Astiasarán, I. (2014). Optimization of a gelled emulsion intended to supply ω -3 fatty acids into meat products by means of response surface methodology. *Meat Science*, 98: 615-621. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2014.06.016>
- Romero, M.C., Fogar, R.A., Rolhaiser, F., Clavero, V. V., Romero, A. M. y Judis, M. A. (2018). Development of gluten-free fish (*Pseudoplatystoma corruscans*) patties by response surface methodology. *Journal of Food Science and Technology*, 55(5):1889-1902. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3106-1>
- Sato, A. C. K., Moraes, K. E. F. P. y Cunha, R. L. (2014) Development of gelled emulsions with improved oxidative and pH stability. *Food Hydrocolloids*, 34, 184-192. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2012.10.016>
- Shariati-Ilevari, S., Ryland, D., Edel, A., Nicholson, T., Suh, M. y Aliani, M. (2016). Sensory and Physicochemical Studies of Thermally Micronized Chickpea (*Cicer arietinum*) and Green Lentil (*Lens culinaris*)

- Flours as Binders in Low-Fat Beef Burgers. *Journal of Food Science*, 81(5), 1230-1242. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13273>
- Usoltsev, D., Sitnikova, V., Kajava, A. y Uspenskaya, M. (2019). Systematic FTIR spectroscopy study of the secondary structure changes in human serum albumin under various denaturation conditions. *Biomolecules*, 9, 1-17. <https://doi.org/10.3390/biom9080359>
- Vieira, S. A., McClements, D. J., Decker, E. A. (2015). Challenges of Utilizing Healthy Fats in Foods. *Advances in Nutrition*, 6, 309-317. <https://doi.org/10.3945/an.114.006965>
- Yilmaz, E. y Ögütçü M. (2015). Oleogels as spreadable fat and butter alternatives: Sensory description and consumer perception. *RSC Advances*, 5, 50259-50267. <https://doi.org/10.1039/c5ra06689a>

Dimensional analysis applied to jacketed shell and tube heat exchangers modeling

(Análisis dimensional aplicado a la modelación de intercambiadores de calor de tubos y coraza enchaquetados)

Andres A. Sánchez-Escalona¹, Yanán Camaraza-Medina², Yoalbys Retirado-Mediaceja³, Ever Góngora-Leyva⁴, Manuel Vega-Almaguer⁵

Abstract

Dimensional analysis was utilized on this research to establish a shortcut model for predicting hydrogen sulphide gas discharge temperature in jacketed shell and tube heat exchangers. Since the equipment belongs to an online industrial facility, the passive experimental method was applied. Selection of the heat transfer process parameters was followed by application of the Buckingham Pi-theorem and the repeating-variables technique. After formulation of the dimensionless groups, approximation of the explicit model equation was carried out through a least-squares multivariate linear regression. The model predictive ability performance was appraised by comparing predictions versus measured discharge temperatures, hence attaining a Pearson correlation of 97.5 %, a mean absolute error of 2.1 K, and 1.7 % maximum deviations. The explicit equation that was obtained is pertinent to studied heat exchangers, when $0.55 \leq \dot{m}_1 \leq 0.60$, $1.06 \leq \dot{m}_2 \leq 1.09$, and $0.22 \leq \dot{m}_3 \leq 0.24$ (fluids flowrate, kg/s). It can be used as an alternative calculation method for quick anticipation of the equipment performance, which overcomes computation of the overall heat transfer coefficients.

Keywords

Buckingham Pi-theorem, heat transfer, hydrogen sulphide, modeling, simulation.

Resumen

En esta investigación se utilizó el análisis dimensional para establecer un modelo abreviado de predicción de la temperatura de descarga de sulfuro de hidrógeno en intercambiadores de calor de tubos y coraza enchaquetados. Teniendo en cuenta que los equipos pertenecen a una instalación industrial en operaciones, se aplicó el método de experimentación pasiva. Después de seleccionar los parámetros del proceso de transferencia de calor, se procedió con la aplicación del teorema Pi-Buckingham y la técnica de repetición de variables. La aproximación de la ecuación explícita del modelo se llevó a cabo posterior a la formulación de los grupos adimensionales, mediante una regresión lineal múltiple basada en el método de mínimos cuadrados. La capacidad predictiva del modelo se evaluó comparando las predicciones con los valores medidos para la temperatura de descarga, obteniéndose una correlación de Pearson del 97.5 %, un error absoluto medio de 2.1 K, y desviaciones máximas de 1.7 %. La ecuación explícita obtenida es válida para los intercambiadores de calor estudiados, en los rangos $0.55 \leq \dot{m}_1 \leq 0.60$, $1.06 \leq \dot{m}_2 \leq 1.09$, y $0.22 \leq \dot{m}_3 \leq 0.24$ (flujo de los fluidos, kg/s). Puede utilizarse como método de cálculo alternativo para predecir con rapidez el rendimiento de los equipos, eludiendo la determinación de los coeficientes globales de transferencia de calor.

Palabras clave

Teorema Pi-Buckingham, transferencia de calor, sulfuro de hidrógeno, modelación, simulación.

1 Universidad de Moa, Moa, Cuba. [aescalon@ismm.edu.cu, https://orcid.org/0000-0002-9770-210X]
2 Universidad de Matanzas, Matanzas, Cuba. [yanan.camaraza@umcc.cu, https://orcid.org/0000-0003-2287-7519]
3 Universidad de Moa, Moa, Cuba. [yretirado@ismm.edu.cu, https://orcid.org/0000-0002-5098-5675]
4 Universidad de Moa, Moa, Cuba. [egongora@ismm.edu.cu, https://orcid.org/0000-0001-5418-5512]
5 Universidade Mandume Ya Ndemufayo, Huíla, Angola. [vegama4242@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-8083-4106]

1. Introduction

Modeling and simulation of heat exchangers are essential for continuous improvement and control of productive processes. They are considered as effective engineering tools, usually applied to the study, upgrade and optimization of different industrial systems (Toro-Carvajal, 2013; Ferreira, Nogueira & Secchi, 2019). Despite the diverse principles that are utilized to classify these models nowadays, they can be broadly categorized into two major groups: [1] those depending on the overall heat transfer coefficient, and [2] alternative models that eludes calculation of the overall heat transfer coefficient.

A vast amount of works is available on the first group. While some authors performed mathematical modelling of shell-and-tube heat exchangers (Turgut, Turgut & Coban, 2014; Markowski & Trzcinski, 2019; Sánchez-Escalona & Góngora-Leyva, 2019) and triple concentric-tube heat exchangers (Batmaz & Sandeep, 2005; Patrascioiu & Radulescu, 2015; Radulescu, Negoita & Onutu, 2019), there are other studies related to numerical modelling of these equipment (Rao & Raju, 2016; Bayram & Sevilgen, 2017; Taler, 2019; Xavier-Andrade, Quitiaquez-Sarzosa & Fernando-Toapanta, 2020). In spite of its broader application, the overall heat transfer coefficient entails time-consuming calculations as well as using heat transfer correlations that regularly provides inaccurate results, with errors ranging up to 40 % (Laskowski, 2011; Markowski & Trzcinski, 2019).

The second group of investigations is mostly comprised by "black-box" solutions and dimensional models. As part of the former, the use of Artificial Neural Networks on this field is extensive, but encloses the following shortcomings: it is difficult to obtain the model explicit equations; there is scarce information about the influence of independent variables on the responses; and mandatory use of a computer or scientific calculator to evaluate the resultant equation (Mohanraj, Jayaraj & Muraleedharan, 2015; Mohanty, 2017; Sánchez-Escalona & Góngora-Leyva, 2018). On the other side, although the dimensional modeling overcomes previous drawbacks, just a few researchers has concentrated on simulating heat exchangers. Laskowski (2011, 2012) proposed model equations for prediction of discharge temperatures in two high-pressure regenerators, which were installed in a 200 MW power plant. He later studied a steam condenser, in order to present succinct and approximated heat-transfer effectiveness expressions. Afterward, Sánchez-Escalona, Góngora-Leyva & Camaraza-Medina (2019) established a model for output predictions on a monoethanolamine heat exchangers system. However, none of the authors utilized the Buckingham Pi-theorem for performance anticipation on three-fluid heat exchangers.

Considering this gap, current contribution investigated the application of dimensional analysis to modeling and simulation of jacketed shell and tube heat exchangers (JS&THE). Since an operational set of hydrogen sulphide gas coolers was evaluated, the model would facilitate quick anticipation of the equipment performance, besides straight-forward assessment of different plant operational scenarios.

2. Materials and methods

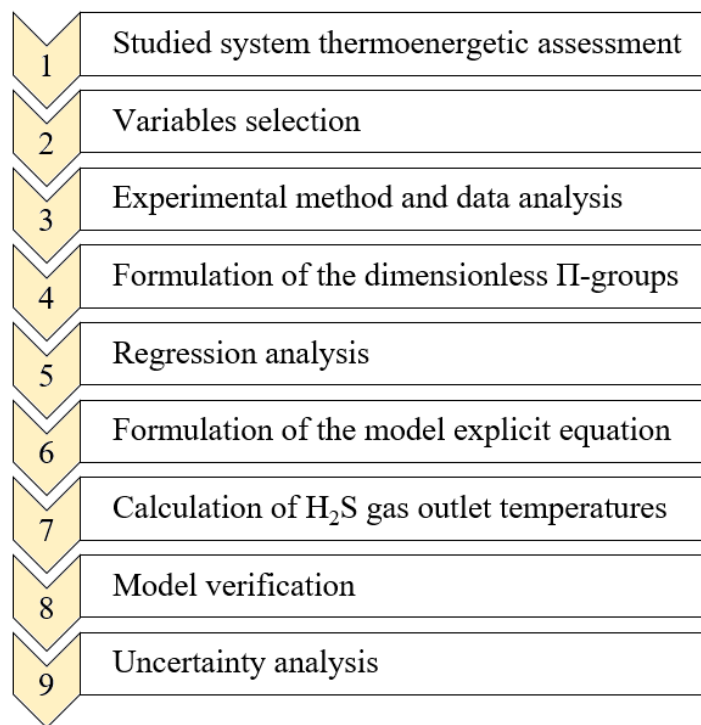
2.1. Applied methodology

This research first focused on identifying parameters with a remarkable influence on three-fluid heat exchangers performance. Next, the experimental method was utilized to collect the data

sets of explanatory variables. The non-dimensional groups were subsequently obtained, followed by resolution of the explicit functional from by applying a multivariate regression analysis. Lastly, the model confirmation was performed by comparing computed results versus measured hydrogen sulphide discharge temperatures. The methodology steps are detailed below (Figure 1).

The statistical parameters utilized to validate the model were: correlation coefficient, Nash-Sutcliffe index, as well as absolute errors (or bias errors) and percentage errors (Ekici & Teke, 2018; Li & Lu, 2018; Pérez-Pirela & García-Sandoval, 2018). The uncertainty analysis was grounded on the Law for the Propagation of Uncertainty, in a case where input quantities are not correlated. It is based on an approximation of first-order of the Taylor series, assuming a symmetrical distribution probability of the errors. In single-sample experiments, where studied variables can not be recurrently measured under the same conditions, uncertainty within the results is evaluated from the systematic errors introduced by direct experimental readings, in preference to statistical analysis of a sequence of experimental observations (JCGM, 2008; Uhia, Campo & Fernández-Seara, 2013).

Figure 1. Applied methodology



2.2. System description

This research examined a system of hydrogen sulphide gas coolers that is online, located on facility which produces 99.8 % pure hydrogen. Installed equipment are three-fluid heat exchangers, shell and tube type, having the designation "BEU with external jacket" according to TEMA (2019). Its main function is cooling down the hydrogen sulphide stream from 416.2 to 310.2 K. Construction materials were stainless steel, 316L AISI-grade. Additional design parameters are listed on Table 1. Inside the equipment, the gas flows through the shell, in a unique pass, while

the coolant circulates at the tubeside and the external jacket, in four passes and single pass, respectively. Since cooling water is fed from a common pipe header, the tubeside and the jacketside inlet temperatures were assumed the same (Figure 2).

Figure 2. Jacketed shell-and-tube heat exchanger sketch

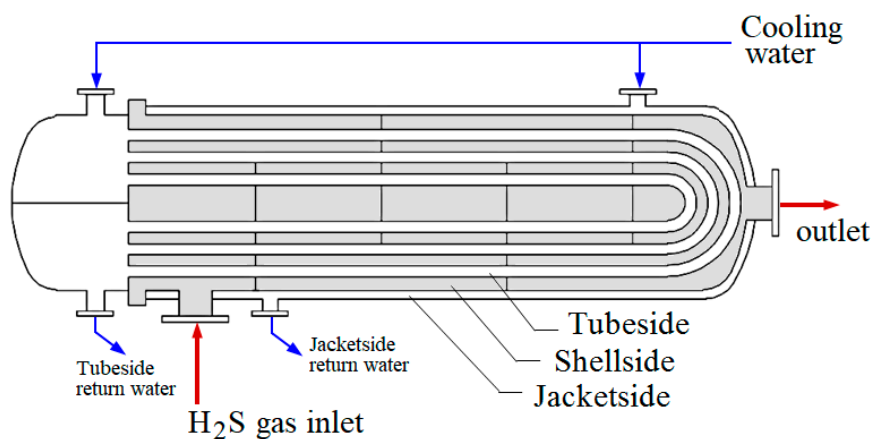


Table 1. Heat exchanger design criteria

Parameter	Tube side	Shell side	Jacket side
Fluid	H ₂ O (l)	H ₂ S (g)	H ₂ O (l)
Number of passes	4	1	1
Mass flow, kg/s	1.10	2.97	0.42
Inlet temperature, K	305.2	416.2	305.2
Inlet pressure, kPa	517.1	965.3	517.1
Outlet temperature, K	316.3	310.2	-
Outlet pressure, kPa	448.2	827.4	-
Fouling factor, m ² ·K/W	0.00035	0.00704	0.00035
Number of tubes	152	-	-
Inside diameter, mm	14.83	457.20	501.95
Outside diameter, mm	19.05	476.25	521.00

2.3. Variables selection

The equations of heat transfer pertained to heat exchangers were used as starting point for selection of the model variables. Equation 1 was derived from the first law of thermodynamics, while Equation 2 was obtained from the ϵ -NTU method. Note that mentioned expressions are acceptable for monophasic streams, steady flow and steady state, as well as negligible heat losses leaking to the surroundings. Additionally, it was assumed that the overall heat transfer coefficients, the specific heat of the fluids, and other thermo-physical properties remain invariant across the heat exchangers (Nitsche & Gbadamosi, 2016).

$$Q = \dot{m} \cdot Cp \cdot \Delta T \quad (1)$$

$$Q = e \cdot (\dot{m} \cdot Cp)_{\min} \cdot \Delta T_{\max} \quad (2)$$

Where: Cp – specific heat at constant pressure, J/(kg·K); ε – heat exchanger heat transfer effectiveness; Q – heat transfer rate, W; \dot{m} – mass flowrate, kg/s; ΔT – temperature difference, K; $\Delta T_{\max} = T_{hot\ in} - T_{cold\ in}$ – maximum temperature difference between the hotter and the colder fluid.

Previous equations were related by means of a heat and mass balance applied to JS&THE, as stated in Equations 3 and 4:

$$Q_2 = Q_1 + Q_3 \quad (3)$$

$$\dot{m}_2 \cdot Cp_2 \cdot \Delta T_2 = e_I \cdot (\dot{m} \cdot Cp)_{I\ \min} \cdot \Delta T_{I\ \max} + e_{II} \cdot (\dot{m} \cdot Cp)_{II\ \min} \cdot \Delta T_{II\ \max} \quad (4)$$

The subscripts are: 1 – tubeside water; 2 – hydrogen sulphide gas; 3 – jacketside water; I – shellside-to-tubeside thermal communication; II – shellside-to-jacketside thermal communication.

Since both water inlet temperatures are equal, the maximum temperature differences remain the same, i.e. $\Delta T_{I\ \max} = \Delta T_{II\ \max}$. Hence, Equation 4 was re-written as Equation 5:

$$\dot{m}_2 \cdot Cp_2 \cdot \Delta T_2 = \Delta T_{\max} \cdot [e_I \cdot (\dot{m} \cdot Cp)_{I\ \min} + e_{II} \cdot (\dot{m} \cdot Cp)_{II\ \min}] \quad (5)$$

The heat transfer effectiveness, defined as the ratio between current heat transfer rate to the maximum heat exchange rate that is theoretically possible, is also a function of non-dimensional parameters like the heat transfer rate ratio (Cr) and the number of transfer units (NTU), as expressed in Equation 6 (Laskowski & Lewandowski, 2012; Nitsche & Gbadamosi, 2016):

$$e = f(NTU, Cr, \text{arrangement of the flow}) \quad (6)$$

The heat transfer rate ratio and the number of transfer units are calculated according to Equations 7 and 8:

$$Cr = (\dot{m} \cdot Cp)_{\min} \cdot [(\dot{m} \cdot Cp)_{\max}]^{-1} \quad (7)$$

$$NTU = U \cdot A \cdot [(\dot{m} \cdot Cp)_{\min}]^{-1} \quad (8)$$

Where: A – heat transfer area, m²; U – overall heat transfer coefficient, W/(m²·K).

At this point, functional relationship amongst dependent and independent variables was defined through Equation 9, which represents an abbreviated form of Equation 5 under the following considerations (Laskowski, 2011; Sánchez-Escalona *et al.*, 2019):

- constant specific heats,
- constant fluids thermo-physical properties,
- invariant heat transfer areas, and
- overall heat transfer coefficients are function of flowrate and inlet temperature of the fluids.

$$\Delta T_2 = f(\Delta T_{\max}; \dot{m}_1; \dot{m}_2; \dot{m}_3) \quad (9a)$$

$$T_{2\ in} - T_{2\ out} = f(T_{2\ in} - T_{1\ in}; \dot{m}_1; \dot{m}_2; \dot{m}_3) \quad (9b)$$

Previous equation utilized the temperature differences instead of individual temperatures, as independent variables, in order to simplify the model. Primary dimension for ΔT and T are the same.

2.4. Experimental method

Due to the continuous production philosophy of the plant, the passive experimental method was utilized. It consisted of measuring and observing input and output variables within the usual working regime of researched set of heat exchangers, hence studying the heat transfer phenomenon as it happens (Edmonds & Kennedy, 2017). Readings of mass flowrates, inlet temperatures and outlet temperatures were carried out on all fluids, using the instruments listed in Table 2. The database included 80 data points, which are statistically described in Table 3.

Table 2. Instrumentation.

Parameter	Instrument description	Precision
Temperature	Industrial thermowells and bimetallic thermometers	0.1 K
Water flowrate	Portable flowmeter, Proline Prosonic Flow 93T	$6.3 \cdot 10^{-6}$ m ³ /s
Gas flowrate	4-20 mA process signal sent to PLC, and Citect SCADA	10^{-4} kg/s

Table 3. Variables descriptive-statistical summary.

Criterion	\dot{m}_1	\dot{m}_2	\dot{m}_3	$T_{cold\ in}$	$T_{hot\ in}$	$T_{1\ out}$	$T_{2\ out}$	$T_{3\ out}$
Unit	kg/s	kg/s	kg/s	K	K	K	K	K
Average	0.58	1.07	0.23	307.2	388.0	316.7	360.0	317.3
Minimum	0.55	1.06	0.22	305.0	363.3	312.2	339.8	311.6
Maximum	0.60	1.09	0.24	308.4	407.0	321.4	378.1	322.2
Std. deviation	0.014	0.017	0.003	0.902	17.747	2.619	11.454	2.727
Range	0.05	0.03	0.01	3.4	43.7	9.2	38.3	10.6

Where: $T_{cold\ in}$ – water inlet temperature, K; $T_{hot\ in}$ – gas inlet temperature, K; $T_{1\ out}$ – outlet temperature of the tubeside water, K; $T_{2\ out}$ – outlet temperature of the gas, K; $T_{3\ out}$ – outlet temperature of the jacketside water, K.

2.5. Dimensional analysis

In principle, the dimensional analysis is a tool for lessening the quantity and complexity of the experimental variables that describes a physical phenomenon. In this way, experiments which might result in several parameters can be reduced to a single set of curves, or even a unique graph, if properly non-dimensionalized (Zohuri, 2015; Al-Malah, 2017).

There are several methods of reducing a number of dimensional variables into a smaller amount of dimensionless groups. In such ambit, the Pi-theorem enunciated by Buckingham is a key approach. It affirms that the Π (Pi) quantities that remains after completing a dimensional analysis are equivalent to the difference amongst the number of quantities describing the pro-

blem and the maximum number of these being dimensionally independent (this last will always be equal to or less than the quantity of fundamental dimensions required to write all dimensional equations). Once obtained, Π -groups are related according to Equation 10, with the exact structure of the functional form being achieved on the basis of experimental data (Ekici & Teke, 2018; Zohuri, 2015).

$$\Pi_1 = f(\Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_{n-j}) \quad (10)$$

Formulation of the dimensionless Π -groups initiated with the method of repeating variables, where the initial step consisted of writing every variable and their primary dimensions (Table 4).

Table 4. Variables of the model.

Notation	Variables name	Dimensions
$T_{2in} - T_{2out}$	H ₂ S gas temperature difference	θ
$T_{2in} - T_{1in}$	Maximum temperature difference	θ
\dot{m}_1	Tubeside water flowrate	$M^1 \cdot T^{-1}$
\dot{m}_2	Gas flowrate	$M^1 \cdot T^{-1}$
\dot{m}_3	Jacketside water flowrate	$M^1 \cdot T^{-1}$

As perceived, five variables ($n = 5$) that involves two independent fundamental physical quantities ($j = 2$) were used to characterize the heat transfer phenomenon taking place within the JS&THE. Hence, three dimensionless groups were projected ($n - j = 3$), as presented from Equation 11 to Equation 13. The repeating variables that were selected are: maximum temperature difference ($T_{2in} - T_{1in}$), and hydrogen sulphide gas mass flowrate (\dot{m}_2).

$$\Pi_1 = (T_{2in} - T_{2out}) \cdot (T_{2in} - T_{1in})^{p_1} \cdot (\dot{m}_2)^{q_1} \quad (11)$$

$$\Pi_2 = \dot{m}_1 \cdot (T_{2in} - T_{1in})^{p_2} \cdot (\dot{m}_2)^{q_2} \quad (12)$$

$$\Pi_3 = \dot{m}_3 \cdot (T_{2in} - T_{1in})^{p_3} \cdot (\dot{m}_2)^{q_3} \quad (13)$$

Constant exponents p and q were determined by substitution of the variables by their dimensions and making the Π -groups to be non-dimensional, as defined in Equation 14 to Equation 16.

$$\{\theta^0 M^0 T^0 L^0\} = \{\theta^1 \cdot \theta^{p_1} \cdot (M^1 T^{-1})^{q_1}\} \quad (14)$$

$$\{\theta^0 M^0 T^0 L^0\} = \{(M^1 T^{-1}) \cdot \theta^{p_2} \cdot (M^1 T^{-1})^{q_2}\} \quad (15)$$

$$\{\theta^0 M^0 T^0 L^0\} = \{(M^1 T^{-1}) \cdot \theta^{p_3} \cdot (M^1 T^{-1})^{q_3}\} \quad (16)$$

By definition, primary dimensions are independent from each other. Hence, the exponents of each primary dimension were individually zeroed to solve the equations. As a result, $p_1 = -1$, $q_1 = 0$, $p_2 = 0$, $q_2 = -1$, $p_3 = 0$ and $q_3 = -1$. After substitution of computed exponents into the initial

equations, the final Π -groups expressions were formulated. They are denoted by Equations 17, 18 and 19:

$$\Pi_1 = (T_{2 \text{ in}} - T_{2 \text{ out}}) \cdot (T_{2 \text{ in}} - T_{1 \text{ in}})^{-1} \quad (17)$$

$$\Pi_2 = \dot{m}_1 \cdot \dot{m}_2^{-1} \quad (18)$$

$$\Pi_3 = \dot{m}_3 \cdot \dot{m}_2^{-1} \quad (19)$$

Then, consistent with the definition given through Equation 10, the model hypothetical formulation was written in the form of Equation 20:

$$\frac{(T_{2 \text{ in}} - T_{2 \text{ out}})}{(T_{2 \text{ in}} - T_{1 \text{ in}})} = f\left(\frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_2}, \frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_2}\right) \quad (20)$$

2.6. Model formulation

Functional relationship between the Π -groups was later determined by using a least-squares multivariate linear regression, hence obtaining a model with the mathematical structure of Equation 21.

$$\frac{(T_{2 \text{ in}} - T_{2 \text{ out}})}{(T_{2 \text{ in}} - T_{1 \text{ in}})} = b_0 + b_1 \cdot \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_2} + b_2 \cdot \frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_2} \quad (21)$$

Where b_0 , b_1 and b_2 are curve-fitting coefficients. Then, the mathematical function that correlates the above-defined Π -groups took the form of Equation 22:

$$\Pi_1 = 1.40234 + 1.84572 \cdot \Pi_2 - 9.82373 \cdot \Pi_3 \quad (22)$$

Finally, the model explicit equation utilized to calculate the hydrogen sulphide gas outlet temperature was obtained by substitution of Equation 17, 18 and 19 into Equation 22, and convenient rearrangement of the terms:

$$T_{2 \text{ out}} = T_{2 \text{ in}} - \left(1.4 + 1.85 \cdot \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_2} - 9.82 \cdot \frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_2} \right) \cdot (T_{2 \text{ in}} - T_{1 \text{ in}}) \quad (23)$$

3. Results and discussion

3.1. Predictive ability performance

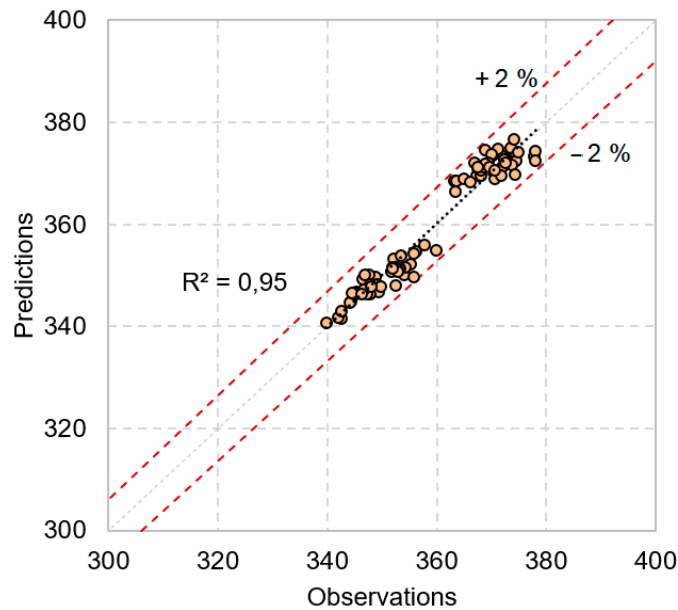
Since computed divergences are slight in the technological process under analysis (Table 5), attained shortcut equation is considered suitable for predicting the heat exchangers performance under varying plant operational conditions. Calculated coefficient of determination informed that 95 % of the output temperature variability was explicated by current model (Figure

3), which is applicable within the following validity ranges: $0.55 \leq \dot{m}_1 \leq 0.60$, $1.06 \leq \dot{m}_2 \leq 1.09$, and $0.22 \leq \dot{m}_3 \leq 0.24$ (units in kg/s).

Table 5. Computed error indexes

Error indexes for $T_{2 \text{ out}}$	Value
Correlation coefficient	0.975
Nash-Sutcliffe index	0.947
Mean absolute error (mean bias error)	2.1 K
Mean relative error (mean percentage error)	0.6 %
Maximum absolute error	6.2 K
Maximum relative error	1.7 %

Figure 3. Scatter plot for $T_{2 \text{ out}}$



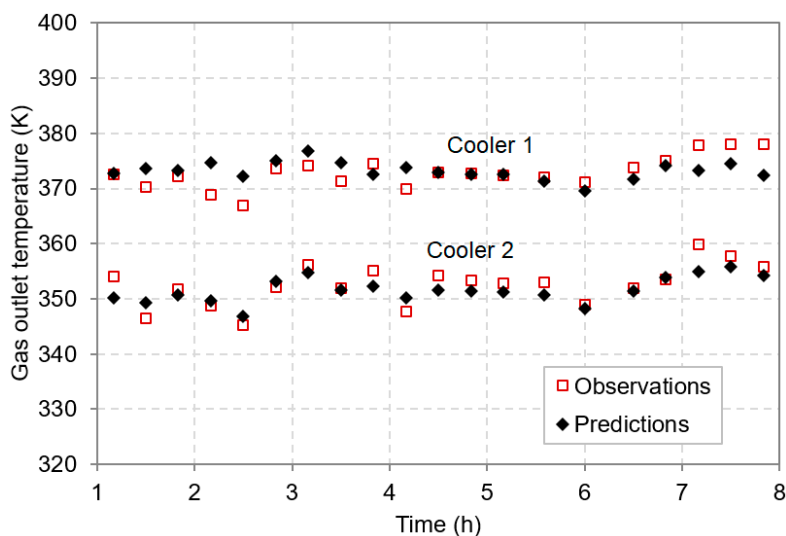
3.2. Trend analysis

The satisfactory agreement between model predictions and experimental observations is confirmed on the following trend graphs (Figure 4).

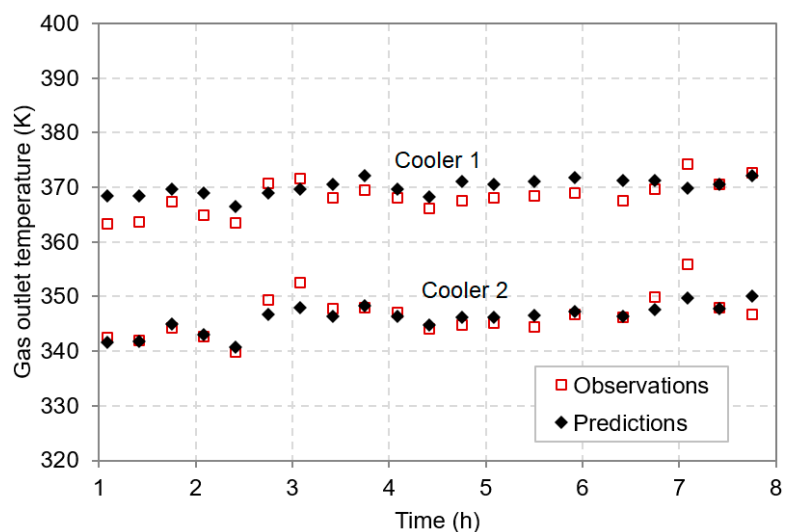
As observed, the gas exit temperature rises over time, mainly caused by progressive efficiency losses. They are ascribed to ongoing sulphur buildups around the surfaces of heat transfer, caused by fluid pressure and temperature drops, thus creating isolating layers that lessen heat transfer effectiveness (Sánchez-Escalona & Góngora-Leyva, 2019). On the other hand, since the researched system consists of two identical JS&THE, installed in a series/parallel layout — with the gas flowing in series, and cooling water in parallel—, the hotter shell (cooler 1) provides a greater heat duty as compared to the colder one (cooler 2), essentially because of the higher

mean temperature difference. This last fact was better illustrated through a thermographic picture of the facility under analysis (Figure 5). It shows two sets of hydrogen sulphide gas coolers, having the left-hand exchangers operating in the cooling cycle, while the right-hand ones were turned over to the online cleaning stage by using intermediate pressure steam (0.586 MPa average). Regardless the operational cycle, the higher temperatures and greater heat loads were confirmed on the first stage (cooler 1) of each set, i.e. lower-side heat exchangers.

Figure 4. Model predictions vs. experimental observations



a) $\dot{m}_2 = 1.06 \text{ kg/s}$

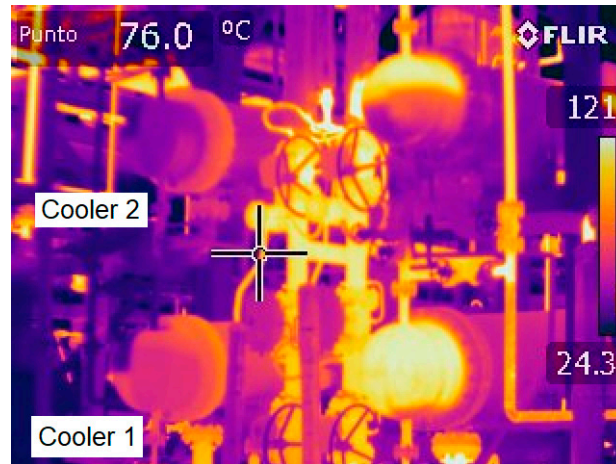


b) $\dot{m}_2 = 1.09 \text{ kg/s}$

It was also experimentally confirmed that heat exchangers did not reach the envisaged performance under observed exploitation conditions. The gas exit temperature exceeded the design value (310.2 K) farther along in 53.1 K, while the tubeside water flowra-

te supplied to each exchanger represented from 49.86 to 54.77 % of the targeted flow (1.1 kg/s). Besides, water never made it to the turbulent regime, as expected for optimum heat transfer. Maximum Reynolds number of 2378 and 502 were calculated for tubeside and the jacketside streams, respectively.

Figure 5. Thermographic picture of studied facility



Application of depicted mathematical modelling techniques assisted the authors in providing a succinct list of technological solutions and organizational actions that will contribute to improve the heat exchangers efficiency:

- to reduce the operational time from eight to six hours (after each cooling cycle, online cleaning is performed with steam flowing through the tubes and the jacketside),
- to perform offline cleaning of the tube-bundle,
- to increase water flowrates until reaching a turbulent flow,
- to optimize baffle spacing, considering that a hydrogen sulphide flowrate incremental would result in lower fouling rates and enhanced heat transfer.

3.3. Uncertainty level

When applying the model explicit expression —Equation 23—, the true outlet temperature value for the hydrogen sulphide gas is expected to lie within the band ± 0.637 K, with an embedded 95 % confidence level. It was calculated from Equation 24 and 25, utilized for computation of the expanded uncertainty assuming a normal distribution in the experimental results.

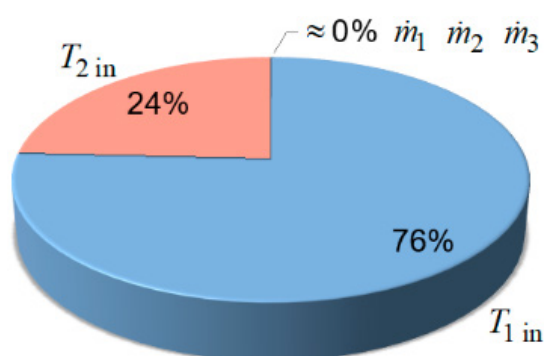
$$u_c = \left[\left(\frac{\partial T_{1\text{in}}}{\partial T_{2\text{out}}} \cdot u_{T_{1\text{in}}} \right)^2 + \left(\frac{\partial T_{2\text{in}}}{\partial T_{2\text{out}}} \cdot u_{T_{2\text{in}}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}_1}{\partial T_{2\text{out}}} \cdot u_{\dot{m}_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}_2}{\partial T_{2\text{out}}} \cdot u_{\dot{m}_2} \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}_3}{\partial T_{2\text{out}}} \cdot u_{\dot{m}_3} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (24)$$

$$U_c = C_f \cdot u_c \quad (25)$$

Where: u_c – combined standard uncertainty; $u_{T_{1\text{in}}}$, $u_{T_{2\text{in}}}$, $u_{\dot{m}_1}$, $u_{\dot{m}_2}$, $u_{\dot{m}_3}$ – direct measurements uncertainty; U_c – expanded uncertainty; C_f – coverage factor.

It was observed that the inlet temperatures have the greatest influence on the uncertainty of the results, while a negligible effect was introduced by fluids flowrates (figure 6). Hence, the selection of more accurate temperature-reading instrumentation is essential, if upgraded outputs are entailed.

Figure 6. Input variables relative uncertainties



4. Conclusions

A shortcut model was proposed for predicting hydrogen sulphide gas discharge temperature in JS&THE. In this respect, the dimensional analysis and the Buckingham Pi-theorem were successfully applied. Comparison of predicted values versus experimental readings resulted in a correlation coefficient of 0.975, and a Nash-Sutcliffe index of 0.947. The mean absolute error was 2.1 K, while deviations (percentage errors) did not exceed 1.7 %. Calculated expanded uncertainty was as low as ± 0.637 K.

On this research the attained explicit equation provided reliable results, and it is of a simpler use for determining the main fluid exit temperature if compared to methods like the ϵ -NTU, that relies on computation of the overall heat transfer coefficient. Major shortcoming consist of the limited application of Equation 23, since not recommended for heat exchangers modeling other than the studied set, nor input variable values outside declared validity ranges. However, this research outcomes are of importance in the assessment of the heat exchangers performance and, consequently, in the improved operation of related industrial process.

Future works are focused on curve-fitting over a wider range of experimental data, in order to extend the model boundaries, as well as performing symbolic regression to obtain alternative mathematical functions that better correlates the dimensionless Π -groups.

References

- Al-Malah, K. I. M. (2017). Exemplification of dimensional analysis via MATLAB® using Eigen values. *International Journal of Applied Mathematics and Theoretical Physics* 3(1), pp. 14-19. <https://doi.org/10.11648/j.ijamtp.20170301.13>
- Batmaz, E. & Sandeep, K.P. (2005). Calculation of the overall heat transfer coefficients in a triple tube heat exchanger. *Heat and Mass Transfer* 41(3), pp. 271-279. <https://doi.org/10.1007/s00231-004-0546-0>
- Bayram, H. & Sevilgen, G. (2017). Numerical investigation on the effect of variable baffle spacing on the thermal performance of shell and tube heat exchangers. *Energies* 10, pp. 1156. <https://doi.org/10.3390/en10081156>

- Edmonds, W. A. & Kennedy, T. D. (2017). *An applied guide to research designs: quantitative, qualitative, and mixed methods*, 2 ed. Los Angeles, USA: SAGE Pub.
- Ekici, C. & Teke, I. (2018). Developing a new solar radiation estimation model based on Buckingham theorem. *Results in Physics* 9, pp. 263-269. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.02.064>
- Ferreira, J.; Nogueira, B. L. & Secchi, A. R. (2019). Dynamic simulation of evaporator in ethanol biorefinery. *Latin American Applied Research* 49(1), pp. 65-70.
- JCGM. (2008). *Evaluation of measurement data– Guide to the expression of uncertainty in measurement*, vol 100. Madrid, Spain: Centro Español de Metrología.
- Laskowski, R. M. (2011). The application of the Buckingham π theorem to modeling high-pressure regenerative heat exchangers in off-design operation. *Journal of Power Technologies* 91(4), pp. 198-205.
- Laskowski, R. M. & Lewandowski, J. (2012). Simplified and approximated relations of the heat transfer effectiveness for a steam condenser. *Journal of Power Technologies* 92(4), pp. 258-265.
- Li, L. & Lu, Z. (2018). A new method for model validation with multivariate output. *Reliability Engineering & System Safety*, 169, pp. 579-592. <https://doi.org/10.1016/j.res.2017.10.005>
- Markowski, M. & Trzcinski, P. (2019). On-line control of heat exchanger network under fouling constraints. *Energy* 185(C), pp. 521-526. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.022>
- Mohanraj, M.; Jayaraj, S. & Muraleedharan, C. (2015). Applications of artificial neural networks for thermal analysis of heat exchangers – a review. *International Journal of Thermal Sciences* 90, pp. 150-172. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2014.11.030>
- Mohanty, D. K. (2017). Application of neural network model for predicting fouling behavior of a shell and tube heat exchanger". *International Journal of Industrial and Systems Engineering* 26(2), pp. 228-246. <https://doi.org/10.1504/IJISE.2017.10004388>
- Nitsche, N. & Gbadamosi, R. O. (2016). *Heat Exchanger Design Guide*. Butterworth Heinemann, an imprint of Elsevier.
- Patrascioiu, C. & Radulescu, S. (2015). Prediction of the outlet temperatures in triple-concentric heat exchangers in laminar flow regime: case study. *Heat and Mass Transfer* 51, pp. 59-66. <https://doi.org/10.1007/s00231-014-1385-2>
- Pérez-Pirela, M. C. & García-Sandoval, J. P. (2018). Control por modos deslizantes de un sistema de intercambio de calor: validación experimental. *Enfoque UTE* 9(4), pp. 110-119. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v9n4.404>
- Radulescu, S.; Negoita, L. I. & Onutu, I. (2019). Effective overall heat transfer coefficient solver in a triple concentric-tube heat exchanger. *Revista de Chimie* 70(6), pp. 2040-2043. <http://www.revista-dechimie.ro>
- Rao, J. B. B. & Raju, V. R. (2016). Numerical and heat transfer analysis of shell and tube heat exchangers with circular and elliptical tubes. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering* 11(6), pp. 1-18. <https://doi.org/10.1186/s40712-016-0059-x>
- Sánchez-Escalona, A. A. & Góngora-Leyva, E. (2018). Artificial neural network modeling of hydrogen sulphide gas coolers ensuring extrapolation capability. *Mathematical Modelling of Engineering Problems* 5(4), pp. 348-356. <https://doi.org/10.18280/mmep.050411>
- Sánchez-Escalona A. A. & Góngora-Leyva, E. (2019). Improvements to the Heat Transfer Process on a Hydrogen Sulphide Gas Coolers System. *International Journal of Heat and Technology* 37(1), pp. 249-256. <https://doi.org/10.18280/ijht.370130>
- Sánchez-Escalona, A. A.; Góngora-Leyva, E. & Camaraza-Medina, Y. (2019). Monoethanolamine Heat Exchangers Modeling Using the Buckingham Pi Theorem. *Mathematical Modelling of Engineering Problems* 6(2): pp. 197-202. <https://doi.org/10.18280/mmep.060207>
- Taler, D. (2019). *Numerical Modelling and Experimental Testing of Heat Exchangers*. Gewerbestrasse, Switzerland: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-91128-1>
- TEMA Inc. (2019). *Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association*, 10.^a ed.

- Toro-Carvajal, L. A. (2013). *Métodos matemáticos avanzados para la modelación y simulación de equipos para procesos químicos y biotecnológicos*. Ph.D. dissertation, Universidad Nacional de Colombia.
- Turgut, O. E.; Turgut, M. S. & Coban, M. T. (2014). Design and economic investigation of shell and tube heat exchangers using Improved Intelligent Tuned Harmony Search algorithm. *Ain Shams Engineering Journal* 5, pp. 1215-1231. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2014.05.007>
- Uhia F. J.; Campo, A. & Fernández-Seara, J. (2013). Uncertainty analysis for experimental heat transfer data obtained by the Wilson Plot Method. *Thermal Science* 17(2), pp. 471-487. <https://doi.org/10.2298/tsci110701136u>
- Xavier-Andrade, A.; Quitiaquez-Sarzosa, W. & Fernando-Toapanta, L. (2020). CFD Analysis of a solar flat plate collector with different cross sections. *Enfoque UTE* 11(2), pp. 95-108. <https://doi.org/10.29019/enfoque.v11n2.601>
- Zohuri, B. (2015). *Dimensional Analysis and Self-Similarity Methods for Engineers and Scientists*. Springer.

Appendix

A. Statistical and error metrics

Pearson correlation coefficient (R):

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (T_{2 \text{ out } i} - \bar{T}_{2 \text{ out}})(T'_{2 \text{ out } i} - \bar{T}'_{2 \text{ out}})}{\left[\sum_{i=1}^n (T_{2 \text{ out } i} - \bar{T}_{2 \text{ out}})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (T'_{2 \text{ out } i} - \bar{T}'_{2 \text{ out}})^2 \right]^{1/2}} \quad (\text{A.1})$$

Nash-Sutcliffe index (Ns):

$$Ns = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (T'_{2 \text{ out } i} - T_{2 \text{ out } i})^2}{\sum_{i=1}^n (T'_{2 \text{ out } i} - \bar{T}'_{2 \text{ out}})^2} \right]^{-1} \quad (\text{A.2})$$

Absolute error (E):

$$E = |T'_{2 \text{ out}} - T_{2 \text{ out}}| \quad (\text{A.3})$$

Percentage error (e):

$$e = E \cdot (T'_{2 \text{ out}})^{-1} \cdot 100 \% \quad (\text{A.4})$$

B. Uncertainty analysis derivatives

$$\frac{\partial T_{1 \text{ in}}}{\partial T_{2 \text{ out}}} = \left(1.4 + 1.85 \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_2} - 9.82 \frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_2} \right)^{-1} \quad (\text{B.1})$$

$$\frac{\partial T_{2 \text{ in}}}{\partial T_{2 \text{ out}}} = - \left(0.4 + 1.85 \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_2} - 9.82 \frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_2} \right)^{-1} \quad (\text{B.2})$$

$$\frac{\partial \dot{m}_1}{\partial T_{2 \text{ out}}} = \frac{20 \dot{m}_2}{37 (T_{1 \text{ in}} - T_{2 \text{ in}})} \quad (\text{B.3})$$

$$\frac{\partial T_{1 \text{ in}}}{\partial T_{2 \text{ out}}} = \left(1.4 + 1.85 \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_2} - 9.82 \frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_2} \right)^{-1} \quad (\text{B.4})$$

$$\frac{\partial \dot{m}_3}{\partial T_{2 \text{ out}}} = \frac{50 \dot{m}_2}{491 (T_{2 \text{ in}} - T_{1 \text{ in}})} \quad (\text{B.5})$$

Evaluación de distintas fórmulas empíricas para el cálculo del tiempo de concentración en la cuenca urbana del río Bélico y Cubanicay, ciudad de Santa Clara

(Evaluation of different empirical formulas for calculating the concentration time in the urban basin of the Belico and Cubanicay rivers, city of Santa Clara)

Carlos Lázaro Castillo García¹, Diego Emilio Abreu Franco², Michael Álvarez González³

Resumen

El tiempo de concentración es un parámetro esencial para el uso de los modelos lluvia-escurrimiento que obtienen el gasto máximo de escurrimiento en un punto de una cuenca. Existen a nivel mundial diversas fórmulas empíricas para su estimación, pero no hay una regla general para elegir la adecuada. En este trabajo se compararon fórmulas utilizadas en el cálculo de este parámetro a partir de la cuenca urbana del río Bélico en la ciudad de Santa Clara con punto de cierre en la Circunvalación Norte de la ciudad. Se realizó un balance de los resultados obtenidos y se emitieron criterios acerca de las ventajas y desventajas de los métodos descritos. Se propuso un umbral de los valores máximos y mínimos de cada una de las fórmulas empíricas utilizadas, lo que permitirá futuras consideraciones en los proyectos de rectificación de cauces urbanos y su drenaje pluvial urbano asociado.

Palabras clave

Hidrología urbana; drenaje urbano; tiempo de concentración; cuenca; intensidad de precipitación.

Abstract

The concentration time is an essential parameter for the use of the rain-runoff models that obtain the maximum runoff expense at a point in a basin. There are various empirical formulas for its estimation worldwide, despite this, there is no general rule when choosing the appropriate one. In the present work, formulas used in the calculation of this parameter were compared from the urban basin of the Bélico river in the city of Santa Clara with the closing point in the city's North Ring Road. A balance was made of the results obtained and criteria were issued about the advantages and disadvantages of the methods described. A threshold of the maximum and minimum values of each empirical formula used was proposed, which allowed future considerations in projects to rectify the urban riverbed and its associated urban stormwater drainage.

Keywords

Urban hydrology, urban drainage, concentration time, basin, precipitation intensity

1 Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas (UCLV), Santa Clara, Villa Clara-Cuba. [ccgarcia@uclv.cu, <https://orcid.org/0000-0002-6430-2775>]

2 Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de Villa Clara (IPH VC), Santa Clara, Villa Clara-Cuba. [diego@vc.hidro.cu, <https://orcid.org/0000-0001-6161-2922>]

3 Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de Villa Clara (IPH VC), Santa Clara, Villa Clara-Cuba. [iph.espsuperior21@vc.giat.cu, <https://orcid.org/0000-0003-2953-4762>]

1. Introducción

Los análisis de los eventos de precipitación extrema, son un componente esencial para el diseño en ingeniería, aún que varios autores (Abreu et al., 2004; Akerman, 2015) en los patrones de las variables hidrometeorológicas están cambiando y se espera que en el futuro los desastres provocados por eventos extremos sean más frecuentes e intensos debido al calentamiento global lo cual según (Azizian, 2018) aumenta la exposición de poblaciones e infraestructuras vulnerables a este problema. El dimensionamiento de proyectos concernientes a estructuras hidráulicas o algún proyecto de aguas requiere la determinación de la forma y el pico del hidrógrafo de proyecto. Obtener este hidrógrafo según varios autores citados en Castillo (2020) para un período de retorno (T_r) representa un problema arduo complejo. A día de hoy existen varios modelos matemáticos y combinaciones como los propuestos por (Upegui, 2020) que simplifican los cálculos en las cuencas urbanas como SWMM y MIKE21.

El proceso de urbanización en los márgenes de los ríos puede ser informal o formal y es el responsable de muchos de los casos de inundaciones alrededor del mundo (Akerman, 2015). La rápida urbanización produce un cambio significativo en el uso del suelo, dando una considerable expansión a las áreas impermeables y su influencia en los procesos de lluvia escorrentía (Freiria, 2014; Llecllish et al., 2017). Lo cual, en el caso que nos ocupa, es la principal causa del estudio hidrológico que se realiza a los ríos que atraviesan la ciudad de Santa Clara.

Dentro de los parámetros empleados en la modelización hidrológica el tiempo de concentración (t_c) es uno de los fundamentales (Agua, 2015). Según la definición de Chow y Maidment, el tiempo de concentración se precisa por:

Un concepto idealizado y definido como el tiempo que le toma una gota de agua de lluvia caída sobre el punto más remoto de un área de drenaje en llegar al punto de cierre de la cuenca, donde la lejanía guarda relación con el tiempo de viaje en vez de la distancia. Probablemente una mejor definición es que es el tiempo después del comienzo de la lluvia que demora toda el área de drenaje en contribuir simultáneamente al punto de cierre. (Chow, et al., 1988)

Se aplica en casi todos los modelos matemáticos y especialmente cuando se utilizan los hietogramas rectangulares (Soriano y Yuste, 2006) relacionados con la fórmula racional. La definición de t_c considera la geometría, geología, tipo de suelo, uso del suelo, topografía y otras características hidráulicas de una cuenca hidrográfica (OMM, s.f.).

En esta investigación se realizó una valoración a partir de varios métodos empíricos para el cálculo del tiempo de concentración por medio de varias formulaciones empíricas existentes de las formulaciones empíricas existentes que son utilizadas comúnmente para este tipo de investigaciones. El objetivo principal del trabajo fue comparar el comportamiento del tiempo de concentración asociado a la cuenca de los ríos Bélico y Cubanicy para poder realizar recomendaciones técnicas asociadas al proyecto integral para el manejo del drenaje urbano de la ciudad de Santa Clara (véase la figura 1).

Figura 1. Ubicación general de los ríos objeto de estudio



2. Metodología

Selección y definición de las principales formulaciones empíricas a utilizar y datos complementarios

Según (Chow, 1964) entre un hietograma e hidrógrafo las relaciones de tiempo asociados al t_r real de una cuenca, se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Conceptos asociados al tiempo de concentración

Tiempo	Definición
$Tlag1$	Tiempo entre el momento del inicio de la lluvia con el centroide del hidrograma.
$Tlag2$	Tiempo entre el centroide de la lluvia efectiva al pico del hidrograma.
$Tlag3$	Tiempo entre el centroide de la lluvia efectiva y el centroide del hidrograma.
$Tlag4$	Tiempo entre el centroide del total de la lluvia al centroide del hidrograma.
$Tlag5$	Tiempo entre el momento inicial de la lluvia al pico del hidrograma.
$Tlag6$	Tiempo entre el final de la lluvia al punto más bajo de la rama final del hidrógrafo
$Tlag7$	Tiempo entre el centroide de la lluvia total al pico del hidrograma.

Fuente: Chow (1964).

El área comprendida bajo un hidrograma simple, es decir con un solo pico, corresponde al volumen de agua que ha pasado por el punto de aforo en el intervalo de tiempo determinado. El hidrograma producido por una tormenta conocida, se conoce como evento, en donde el tiempo

base t_b , es el tiempo transcurrido entre el momento en que empiezan a llegar las componentes de la escorrentía generadas por el aguacero y el momento en que estas ya dejan de actuar.

Según ONN (2018), se considera que el tiempo de concentración puede definirse a partir de la observación de la escorrentía superficial. Si se aplica una lluvia uniforme a una cuenca, las zonas más cercanas a la salida contribuyen a la escorrentía casi de inmediato. Mientras la lluvia continúa, los aportes de las zonas de aguas arriba llegan posteriormente, hasta que el flujo de todos los puntos de la cuenca se concentra en la zona baja. Por lo tanto, el tiempo de concentración se corresponde con la duración necesaria, con lluvia uniforme, para que el total de la cuenca contribuya a la escorrentía directa en el tramo final del cauce.

Para la determinación de este parámetro, puede utilizarse un procedimiento de aproximación reiterativa para determinar el tiempo crítico de concentración (t_c), donde existen varias rutas posibles que deben ser consideradas a partir de las particularidades de cada proyecto. El tiempo de concentración de cualquier punto en un sistema de drenaje urbano de aguas lluvias, es la suma del tiempo de entrada t_0 (tiempo que demora la gota de lluvia en llegar a los receptores pluviales) y del tiempo de flujo (t_f) en las tuberías, ubicadas aguas arriba del flujo de salida en las zonas de captación de la cuenca urbana (Chow, 1994) tal y como se expresa en la Ecuación 1.

$$t_c = t_f + t_0 \quad (1)$$

Sin embargo, varios autores como (Upegui y Gutiérrez, 2011; Freiria, 2014; Castillo, 2020) amplían la ecuación 1 a la siguiente expresión (ver ecuación 2):

$$t_c = t_1 + t_2 + t_3 \dots + t_n \quad (2)$$

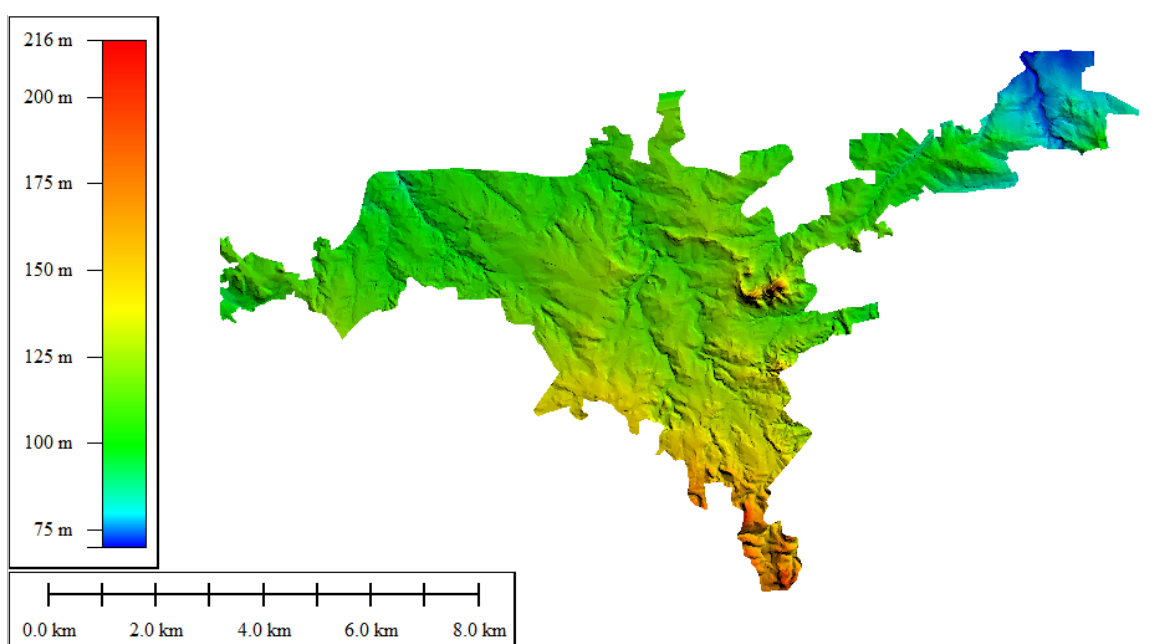
Donde t_n son los tiempos de viaje en distintos segmentos de la ruta más alejada del flujo, cada uno de estos tiempos pueden tener formulaciones distintas en correspondencia a las velocidades encontradas en ellos debido a sus características físicas. La ecuación 2 responde con mayor precisión a la definición, hay que tener en cuenta el recorrido que pueda realizar la gota de lluvia desde el punto más alejado hasta el punto de cierre, si consideramos una cuenca experimental imaginaria totalmente urbanizada podemos observar que la gota de lluvia desde su llegada a la superficie, realiza varios trayectos, si cae encima de pavimento, en un aguacero pronunciado se puede presenciar como el escurrimiento es a través de láminas desde el eje de la misma hasta la cuneta de drenaje, en ese caso las ecuaciones para hallar el tiempo en ese trayecto de viaje se le denomina flujo en lámina (*sheet flow*), al llegar a la cuneta en dependencia de la geometría que tenga esta última el flujo puede considerarse como *sheet flow*, *shadow flow* (flujo poco profundo) o *channel flow* (flujo en canal) (Chow et al., 1988), lo que hace que su formulación de cálculo difieran, incluso en zonas donde la cuneta puede desaparecer y se observa el flujo sobre el suelo, cambia la forma de enfrentar estos cálculos.

En el caso de cuencas urbanas es común que a las áreas de aporte a nodos de un sistema de drenaje no sobrepasen la cifra de 1 ha. Considerando una manzana de 100 m de largo y 100 m de ancho. Esto en cuencas urbanas se traduce a t_c muy bajos que son limitados en la bibliografía a entre 5 y 10 minutos como mínimo (Agua, 2015; ONN, 2018; Azizian, 2018).

Dado que el concepto de tiempo de concentración tiene una cierta base física, han sido numerosos los autores que han obtenido formulaciones del mismo, a partir de características morfológicas y geométricas de la cuenca (Lleclish y Loayza, 2017). En el siguiente epígrafe se muestran algunas de esas fórmulas para el cálculo de t_c en cuencas urbanas y semi-urbanas o rurales de poco tamaño, las cuales serán aplicadas a la cuenca del río Bélico y Cubanicay en

la ciudad de Santa Clara. Es importante mencionar que para su cálculo es imprescindible conocer las futuras condiciones del uso del suelo (Chow, 1964). Para la delimitación de la cuenca fue utilizado un Modelo Digital de Elevación (MDE) elaborado en 2016 por el Grupo empresarial GEOCUBA Villa Clara-Sancti Spíritus, adquirido por la Empresa de Proyectos e Investigaciones Hidráulicas de Villa Clara (IPH VC) con precisión aceptable para el estudio de los parámetros morfo-geométricos de la cuenca, necesarios para el cálculo de los diferentes métodos implementados. El MDE se trabajó en el software AutoCAD Civil 3D para ubicar un punto de cierre en el río y definir el área de aporte o cuenca que tributa escurrimiento en este lugar de manera totalmente digital acorde al modelo de elevación disponible (véase la figura 2).

Figura 2. Representación del MDE utilizado en el estudio de los ríos Bélico y Cubanicay



La fórmula racional es uno de los modelos matemáticos de lluvia escurrimiento más utilizados en diversos lugares del mundo (OMM, s.f.; Soriano y Yuste, 2006; Upegui y Gutiérrez, 2011). En el caso de su formulación, se toma la intensidad probable para el tiempo de concentración de la cuenca de estudio. Para la aplicación de este modelo es necesario contar con Curvas de Intensidad-Frecuencia-Duración las cuales son comúnmente usadas en recursos hídricos para dar soportes al planeamiento y diseño de estructuras hidráulicas.

La hipótesis fundamental en el diseño hidrológico por el método Racional radica en la suposición de que la duración de la lluvia máxima o de diseño coincide con el tiempo de concentración de la cuenca, ya que las lluvias de mayor duración no producen un aumento en los caudales punta. Sin embargo, establece una diferencia importante al destacar que el tiempo de concentración es la fase del aguacero que determina el caudal máximo, y esta fase puede ser igual o no a la duración del aguacero, ya que la duración de la lluvia no está relacionada con el tamaño de la cuenca y es solo función de variables climáticas. Por lo que la lluvia asociada a los caudales máximos se refiere al intervalo más intenso de duración igual al tiempo de concentración, pero esa duración no equivale a la duración del aguacero, ya que solo una fase del aguacero puede ser suficiente para generar una creciente si el suelo se encuentra saturado.

Fórmulas para el cálculo del tiempo de concentración

Las fórmulas empíricas son expresiones matemáticas que sintetizan, mediante regresiones, correlaciones u otros medios numéricos, una serie de resultados observados en diversos ensayos, sin necesidad de disponer de una teoría que la sustente. En hidráulica se utilizan con frecuencia fórmulas empíricas para la determinación de diferentes variables, como el tiempo de concentración de una cuenca t_c .

Para el cálculo del t_c (en horas):

- Kirpich: Quizás la fórmula más utilizada a nivel mundial para hallar t_c . Se estimó originalmente para cuencas de Tennessee y Pennsylvania en los Estados Unidos entre áreas de 0.004 y 0.45 km² con pendientes entre 3 % y 12 % y con significativo flujo de canales (Lleclish y Loaiza, 2017)

Posee dos expresiones fundamentales: (Azazian, 2018)

$$t_c = 0.0653 L^{0.77} S^{-0.385} \quad (3) \text{ (Kirpich-Tennessee en 1940)}$$

$$t_c = 0.01104 L^{0.77} S^{-0.5} \quad (4) \text{ (Kirpich- Pennsylvania en 1940)}$$

- Bransby-Williams: Sugerida por The Institution Engineers, Australia en remplazo de la fórmula de Kirpich, al obtener estos valores de t_c muy bajos con respecto a los parámetros medidos (Lleclish y Loaiza, 2017).

$$t_c = 0.605 L(100S)^{-0.2} A^{-0.1} \quad (5) \text{ (ASDOT en 1995)}$$

- California Culverts Práctice: Modificación de la ecuación de Kirpich; desarrollada para pequeñas cuencas montañosas en California. Es la fórmula oficial de la NC 1239-2018 para el cálculo del t_c en el drenaje pluvial.

$$t_c = 0.95 L^{1.155} H^{-0.385} \quad (6) \text{ (CDH en 1960)}$$

- Carter: Está datada con cuencas urbanas de los Estados Unidos con áreas menores a 20.72 km² y pendientes menores a 0.5% (Azazian, 2018).

$$t_c = 0.0977 L^{0.6} S^{-0.2} \quad (7) \text{ (Carter en 1961)}$$

- Chow: Calibrada en 20 cuencas rurales de entre 0.01 y 18.2 km², con pendientes entre 0.5 y 9 % (Azazian, 2018).

$$t_c = 0.1602 L^{0.64} S^{-0.32} \quad (8) \text{ (Chow en 1961)}$$

- FAA: Fórmula de la Federal Aviation Administration elaborada en 1970 con calibraciones en aeropuertos con lo cual es ideal para áreas urbanizadas (Azizian, 2018).

$$t_c = 0.3788(1.1 - C)L^{0.5}S^{-0.332} \quad (9) \text{ (FAA en 1961)}$$

- Kerby-Hathaway: Ecuación elaborada a partir de inundaciones en cuencas experimentales urbanas menores a los 0.1 km² y con longitudes menores a los 0.37 km. (Azizian, 2018)

$$t_c = 0.6061N^{0.47}L^{0.47}S^{-0.234} \quad (10)$$

- SCS Lag: Ecuación desarrollada por el Servicio Conservación del Suelo de Estados Unidos (Soil Conservation Services) a partir de la información de cuencas de uso agrícola; ha sido adaptada a pequeñas cuencas urbanas con áreas inferiores a 8 km², se ha encontrado que generalmente es buena cuando el área se encuentra completamente pavimentada; para áreas mixtas tiene tendencia a la sobreestimación. (Chow, et. al, 1988)

$$t_c = 0.057\left(\left(\frac{1000}{CN}\right) - 9\right)^{0.7}L^{0.8}S^{-0.5} \quad (11)$$

- Corps of Engineers: Datada en 25 cuencas rurales con áreas menores a 12 km² (Azizian, 2018).

$$t_c = 0.191 L^{0.76} S^{-0.19} \quad (12)$$

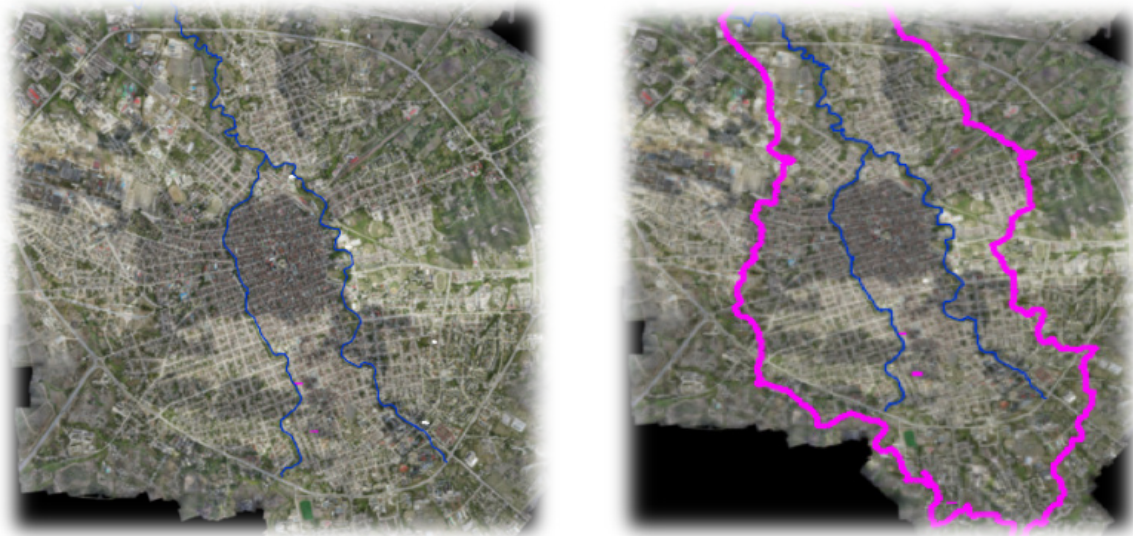
Donde: A, área de la cuenca en km²; C, coeficiente de escorrentía de la fórmula racional; CN, Número de Curva del SCS; H, diferencia de cotas del cauce en m; L, longitud del cauce en km; S, pendiente del cauce principal m/m; N, coeficiente de retardo; n, coeficiente de rugosidad de Manning.

Área de estudio

La cuenca urbana del río Bélico es predominantemente llana, típica de la zona hidrológica central de Cuba y ha sido seleccionada como cuenca experimental dada su cercanía a la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, su ubicación en la ciudad de Santa y a la situación actual del drenaje deficiente debido a las incorrectas políticas urbanísticas de la ciudad que han provocado la disminución de los cauces de los afluentes y ríos principales. El punto de cierre de la cuenca se define en la Circunvalación Norte, hasta este lugar la cuenca posee dos ríos o afluentes principales, el Bélico y el Cubanicay que nacen en las cercanías de la Circunvalación Sur y atraviesan el centro urbano de sur a norte (véase la figura 3).

Para obtener los parámetros requeridos en las ecuaciones de tiempo de concentración, dígase longitud del cauce, pendiente media del cauce y área de la cuenca se utiliza el software AutoCAD Civil 3D v2015 como una herramienta para el dibujo de elementos vectoriales y para la digitalización. La gran capacidad del software permite trabajar con una cantidad considerable de datos de campo y realizar grandes análisis como la modelación de superficies de terreno, curvas de nivel, el diseño de secciones y el cálculo ágil de áreas y volúmenes que le faciliten al profesional la toma de decisiones en un proyecto específico. En este caso, el software es utilizado para un comando llamado *Catchments* que permite definir un punto de cierre en cualquier lugar del MDE y define el área tributante a ese punto, que no se representa en la figura 3 ya que el objeto de mayor interés es la zona urbana.

Figura 3. Ríos Bélico y Cubanicay a la izquierda y cuenca tributaria a la derecha



Se definen entonces los parámetros geométricos fundamentales de la cuenca:

- Área (A): 13.51 km²
- Longitud del cauce principal (L): 7.12 km
- Desnivel del cauce principal (H): 44.56 m
- Pendiente del cauce principal (S): 0.00625 m/m

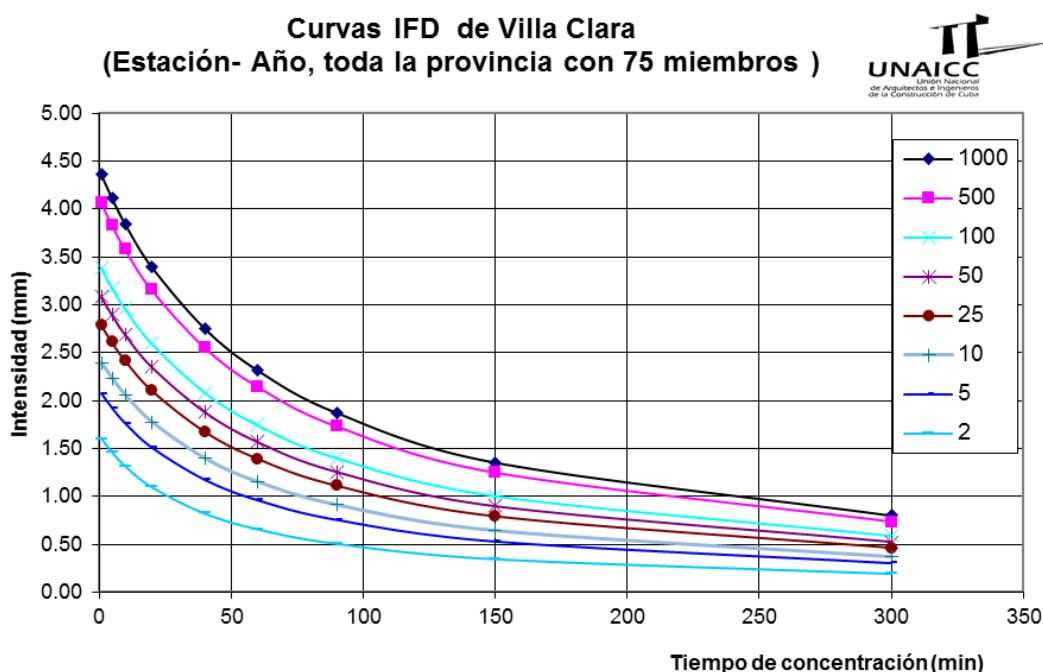
La cuenca cumple con la mayoría de las recomendaciones para la aplicación de las diez fórmulas anteriormente descritas. Ahora es necesario la elección de los parámetros hidrológicos-hidráulicos, para este estudio se escogieron los siguientes:

- Número de curva NC (SCS): El valor del número de curva recomendado por Chow et al. (1988) en áreas urbanas en climas tropicales es 95 en nuestro caso se asumirá 90.
- Coeficiente de retardo N: Según Akerman (2015) en cuencas urbanas este coeficiente varía entre 0.02 y 0.08 el valor elegido para la cuenca del río Bélico es 0.05.
- Coeficiente de rugosidad de Manning (n): Para la elección del coeficiente se supone un cauce marcado por el crecimiento de árboles y matorrales densos que son comparables con la urbanización, el valor escogido 0.09 (Chow, 1994).
- Intensidad máxima de precipitación *i*: Para la realización de este trabajo se utilizaron las curvas IFD para la región central elaboradas por Abreu et al. (2004) las cuales poseen forma de curva típica (consultar ecuación 12 y figura 4).

$$i = \frac{A}{(B+t)^n} \quad (13)$$

Donde: A, B y n son coeficientes que dependen de la región hidrológica analizada, sino que fueron considerados a partir de los estudios presentados por Abreu et al. (2004), actualizados por Castillo (2020).

Figura 4. Curvas IFD para la región central de Cuba Fuente: (Abreu et al., 2004)



Para el caso de estudio, la Norma Cubana 1239-2018 que rige los procedimientos para el drenaje pluvial urbano en Cuba, se considera al río como medianamente denso con respecto a la cantidad de habitantes por km² que habitan a sus alrededores, por tanto, se toma una probabilidad de diseño del 2 % o 50 años de período de retorno, de esta manera se trabaja con la ecuación 13 de curva expresada la i : mm/min.

$$i = \frac{188.6}{60.1+t} \quad (14)$$

3. Resultados

Los resultados de la estimación del tiempo de concentración son muy diferentes entre sí ya que cada autor estima su ecuación para cuencas con características muy particulares, por lo que debe tenerse mucho cuidado para la selección del valor más adecuado para el tiempo de concentración (véase la figura 5).

A simple vista se saca la conclusión de que los valores de las ecuaciones del SCS Lag, Carter y Kirpich-Pennsylvania son los más alejados de la tendencia.

Suponiendo una ecuación típica de t_c :

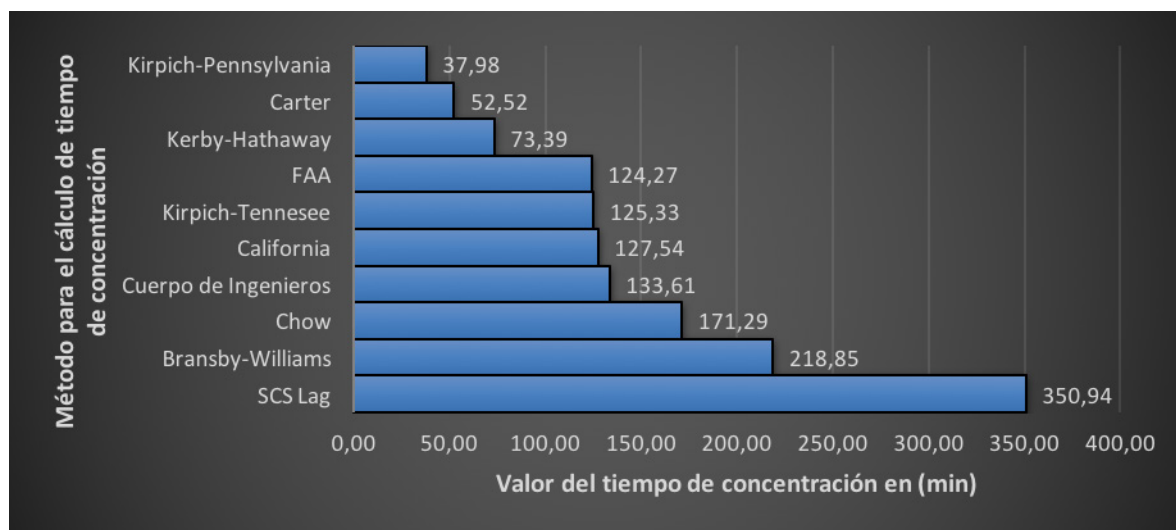
$$t_c = K_1 K_2 K_3 \quad (15)$$

Donde:

- K1: Coeficiente de ecuación de retardo
- K2: Coeficiente que depende de características hidráulicas-hidrológicas de la cuenca.
- K3: Coeficiente de parámetros geométricos L y S.

Los valores de K1 de las ecuaciones señaladas son de los más bajos mientras el valor de K2 y K3 en la ecuación SCS Lag es el más alto (véase las tablas 2 y 3).

Figura 5. Gráfico de los resultados del TC



Nota: Se observan los valores de FAA; 318 Kirpich; California y Cuerpo de Ingenieros como valores centrales próximos a los valores reales a actualizar en la cuenca según Abreus et al (2004).

Tabla 2. Valores de K(n) para las distintas fórmulas valoradas

	K1		K2		K3
California	0.95	SCS Lag	1.69	SCS Lag	3643.1
Kerby-Hathaway	0.6061	Kirpich-Tennessee	1	Kirpich-Pennsylvania	3440.5
Bransby-Williams	0.605	Kirpich-Pennsylvania	1	Kirpich-Tennessee	1919.3
FAA	0.3788	California	1	Chow	1069.2
Cuerpo de Ingenieros	0.191	Carter	1	FAA	1025.2
Chow	0.1602	Chow	1	Cuerpo de Ingenieros	699.6
Carter	0.0977	Cuerpo de Ingenieros	1	Carter	537.6
Kirpich-Tennessee	0.0653	Bransby-Williams	0.771	Kerby-Hathaway	494.2
SCS Lag	0.057	FAA	0.32	Bransby-Williams	469.2
Kirpich-Pennsylvania	0.01104	Kerby-Hathaway	0.245	California	134.3

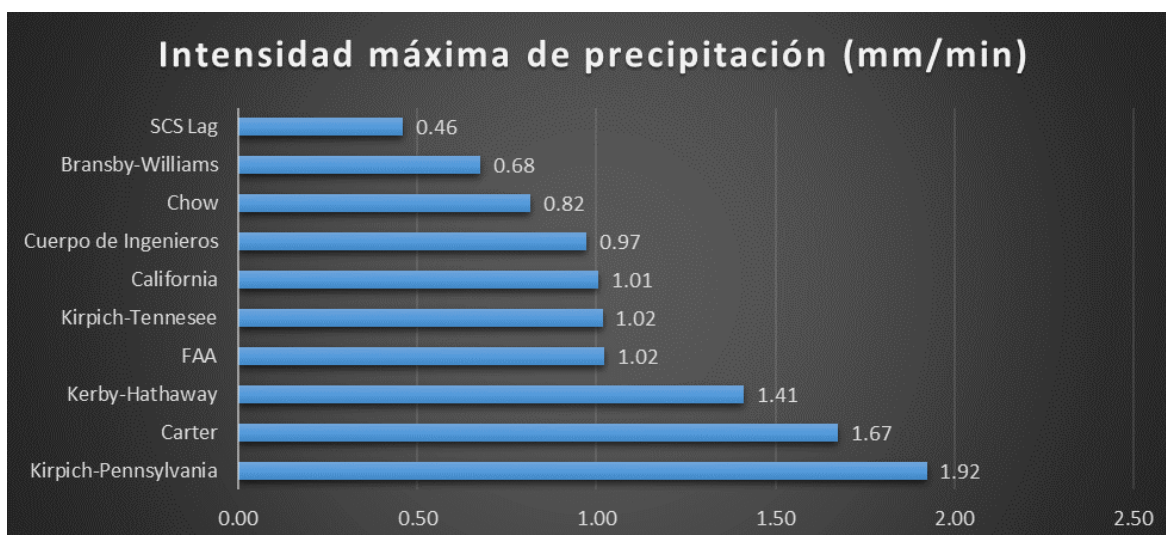
Tabla 3. Resultados estadísticos principales del t_c calculado con las distintas fórmulas

Parámetro estadístico	Valor
Desviación estándar	91.18
Promedio	141.57
Covarianza	8313.37

Para seguir el análisis se realizaron los estudios estadísticos de la intensidad máxima de precipitación (I_m) (véase las tablas 4, 5 y figura 6).

Tabla 4. Cálculo de la Intensidad máxima de precipitación

Fórmula	I_m para 2 % (mm/min)
<i>Kirpich-Pennsylvania</i>	1.92
<i>Carter</i>	1.67
<i>Kerby-Hathaway</i>	1.41
<i>FAA</i>	1.02
<i>Kirpich-Tennessee</i>	1.02
<i>California</i>	1.01
<i>Cuerpo de Ingenieros</i>	0.97
<i>Chow</i>	0.82
<i>Bransby-Williams</i>	0.68
<i>SCS Lag</i>	0.46

Figura 6. Gráfico de I_m se observa la media alrededor de los 1 y 1.10 mm/min**Tabla 5.** Valores estadísticos fundamentales de I_m .

Parámetro estadístico	Valor
Desviación estándar	0.449
Promedio	1.10
Covarianza	0.202

Con estos resultados es necesaria una comparación de la ecuación de California *Culverts Practice* (CCP) recomendada en la NC 1239-2018 para el cálculo del drenaje pluvial urbano con la ecuación del SCS que es la que menores resultados brindan con respecto a I_m . Esta comparación se realiza a partir de cinco áreas hidrológicas urbanas (AHU) definidas en la tesis "Estrategias para la concepción de Sistemas de Drenaje Urbano en la ciudad de Santa Clara" elaborada

por Castillo (2020) para definir el cambio de los gastos máximos de escurrimiento con respecto al cambio del método de cálculo de t_c (véase la tabla 6).

Tabla 6. Comparación de CCP y SCS para áreas hidrológicas de Santa Clara

	L (km)	S m/m	A km ²	CN	t_c (CCP)	t_c (SCS)	I máx (CCP)	I máx (SCS)	Q (CCP)	Q (SCS)
<i>SDU Libertad</i>	1.035	0.02	0.18	90	20.35	47.55	2.34	1.75	5.04	3.77
<i>SDU Condado Calle-Real</i>	2.224	0.01	1.4	90	42.04	105.1	1.85	1.14	30.9	19.11
<i>SDU Capiro</i>	0.6	0.02	0.21	90	13.71	31.84	2.56	2.05	6.41	5.15
<i>SDU Hospital- Calle Maceo</i>	0.344	0.04	0.13	90	6.37	13.16	2.84	2.57	4.41	4
<i>SDU Condado Sur</i>	0.81	0.02	0.27	90	15.72	35.82	2.49	1.97	8.03	6.34

El valor mínimo del tiempo de concentración de la norma es de diez minutos, por lo que el valor de intensidad del SDU Hospital Calle Maceo es reducido a prácticamente el mismo del SDU Capiro. La muestra consideró áreas hidrológicas vertientes al río Bélico, con distintos valores de A y L, lo que favorece trabajar en un rango aceptable de valores.

Los resultados anteriores evidencian que el método SCS es un método menos conservador a la hora de brindar un tiempo de concentración de diseño en áreas hidrológicas de aporte mayores a 0.1 km² lo que lo hace un método efectivo para el diseño de redes de drenaje pluvial urbano en áreas superiores a 0.1 km² lo cual ayuda a no sobreestimar los gastos de diseño a partir de la fórmula racional.

4. Conclusiones y recomendaciones

De acuerdo con los resultados obtenidos se llegó a las siguientes conclusiones:

1. El tiempo de concentración de una cuenca es un parámetro muy difícil de determinar cuando no se cuentan con mediciones que permitan su validación con las fórmulas empíricas.
2. Existen en el mundo varias fórmulas de t_c generalmente basadas en la expresión de componentes L y S de la geometría de la cuenca, aunque este parámetro no depende solo de estos, es necesario realizar un análisis detallado de los métodos de onda cinemática ya que estos tienen intrínsecamente en sus formulaciones parámetros hidrológicos e hidráulicos que son parte importante del t_c como la Intensidad máxima de precipitación y el coeficiente n de Manning.
3. El estudio comprueba que la fórmula propuesta por la NC 1239-2018 (California *Culverts Practice*) brinda un valor cercano al promedio de las fórmulas de t_c con las características de L y S como base fundamental de cálculo.
4. Las fórmulas de t_c para las condiciones de la ciudad de Santa Clara se dividen en tres subgrupos fundamentales:
 - a. Fórmulas no conservadoras: Aquellas cuyo valor de t_c es superior a la media. (SCS Lag, Bransby-Williams, Chow).

- b. Fórmulas de la media: Aquellas cuyo valor de t_c coinciden prácticamente con el valor promedio de las ecuaciones analizadas (Cuerpo de Ingenieros, California Culvert Practice, Federal Aviation Agency, Kirpich-Tennessee).
 - c. Fórmulas conservadoras: Aquellas cuyo valor de t_c es inferior al de la media. (Kerby-Hathaway, Kirpich-Pennsylvania, Carter).
5. En el análisis hidrológico de los ríos Bélico y Cubanicy para el proyecto integral de drenaje urbano de la ciudad de Santa Clara se recomienda la ecuación de California Culvert Practice mientras no se conozca el tiempo de retardo de la avenida en el río Bélico con punto de cierre en la Circunvalación Norte.
 6. Para el análisis de áreas hidrológicas pequeñas o subcuencas urbanas perteneciente a los ríos Bélico y Cubanicy se recomienda la ecuación del SCS Lag utilizada en muchos países para calcular t_c en cuencas urbanas y diseñada para este tipo de trabajos.
 7. Se define el tiempo de concentración teórico de la cuenca del río Bélico en el punto de cierre ubicado en el puente de Circunvalación Norte en 128 minutos (dos horas aproximadamente).

Luego de haber expuesto las conclusiones previas se recomiendan los siguientes aspectos:

1. Este tiempo de concentración calculado solo es una aproximación teórica por lo cual es necesaria su validación mediante técnicas de medición en puntos a determinar dentro de la ciudad y en el punto de cierre para obtener el valor real del mismo.
2. Es necesario recordar que la ciudad de Santa Clara posee una situación muy tensa con el drenaje de los ríos fundamentales y una de las causas es la pérdida de los cauces naturales en detrimento de la nueva urbanización, esta fórmula no tiene en cuenta esta situación.
3. En caso de que el proyectista decida ser un poco conservador o menos se propone la utilización de:
 - a. La fórmula de Chow con tiempos de concentración más altos.
 - b. La fórmula de Kerby-Hathaway con tiempos de concentración más bajos. Haciendo la salvedad de que para el caso de que se utilice la fórmula es responsabilidad de este trabajo su definición a pesar de que la cuenca no cumpla con las características con las cuales fue elaborada.

Referencias

- Abreu, D., Darias, M., y Santana, P. (2004). *Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia de las lluvias máximas para la región central*. Documento Inédito presentado en II Seminario Internacional del uso del agua. Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de Villa Clara (IPH VC), Unión Nacional de Arquitectos e Ingenieros de la Construcción de Cuba (UNAICC), Santa Clara, Villa Clara, Cuba.
- Agua, C.N. (2015). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. México, DF: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://bit.ly/3jeCHTx>
- Akerman, P.M.B. (2015). *Utilización de modelos hidráulicos bidimensionales en la determinación del tiempo de concentración* (Doctoral dissertation, Universidad Politécnica de Madrid). <https://bit.ly/3wZz1ZA>

- Azizian, A. (2018). Uncertainty analysis of time of concentration equations based on first-order-analysis (FOA) method. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(1): 327-341. <https://doi.org/10.3844/ajeassp.2018.327.341>
- Castillo, C. (2020). *Estrategias para la concepción de Sistemas de Drenaje Urbano en la ciudad de Santa Clara*. Trabajo de Diploma. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas. Santa Clara, Villa Clara, Cuba. <https://bit.ly/3gUsbyY>
- Chow, V.T. (1964). *Handbook of applied hydrology*. <https://bit.ly/3gXj28W>
- Chow, V.T. (1994). *Hidráulica de canales abiertos* (No. 627.13 C552h). McGraw-Hill.
- Chow, V.T., Maidment, D.R., y Mays, L.W. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering. <https://bit.ly/3jcgEN1>
- Freiria, J.M. (2014). *Modelación hidrológica de la cuenca Centro-Este del departamento San Justo para la sistematización de excedentes hídricos* (Bachelor's thesis, Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales) <https://bit.ly/2UDGcIS>
- Lleclish Hernández, K.A., y Loayza Briones, L.E. (2017). *Propuesta de solución para evitar inundaciones provenientes de la quebrada San Ildefonso*. <https://bit.ly/3zYUyw>
- OMM (s.f.). G.D.P. Hidrológicas 168. http://www.wmo.int/pages/prog/hwrp/publications/guide/spanish/168_VolII_es.pdf
- Soriano, M.R., y Yuste, J.A.F. (2006). Nueva formulación para la obtención de la energía cinética de la lluvia. Análisis comparativo con ecuaciones empíricas. *Ecología*, (20), 445-52. <https://bit.ly/2U5F0mc>
- ONN (2018) *Especificaciones para el diseño y construcción de alcantarillado sanitario y drenaje pluvial urbano. NC 1239:2018*. La Habana. <https://bit.ly/2SrZqVM>
- Upegui, J.J.V., y Gutiérrez, A.B. (2011). Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la quebrada San Luis, Manizales. *Dyna*, 78(165), 58-71. <https://bit.ly/2T5eK6c>

Remoción de metales pesados (Cr⁺⁶, Ni, Zn) de lixiviados del Relleno Sanitario de la ciudad de Veracruz, México con barreras reactivas permeables de arena sílica

(Removal of Heavy Metals (Cr⁺⁶, Ni, Zn) from Leachates of the Sanitary Landfill of the City of Veracruz, Mexico with Reactive Permeable Silica Sand Barriers)

Manuel Alberto Susunaga Miranda¹, Bertha María Estévez Garrido², Benigno Ortiz Muñiz³, Rodrigo Manuel Susunaga Estévez⁴

Resumen

El uso de las Barreras reactivas permeables como material para la remoción de metales pesados de los lixiviados de los rellenos sanitarios ha sido comprobado para diversos materiales, la Arena sílica procedente de las costas del municipio de Alvarado Veracruz en México tienen las características de tamaño y composición requeridas para ser utilizadas para este fin, se colectaron muestras de Lixiviado procedente del Relleno Sanitario de la ciudad de Veracruz y se determinaron las concentraciones de Ni, Cr⁺⁶ y Zn fueron respectivamente 0.0818, 0.186 y 0.224 mg/l, se construyeron tres columnas de acrílico y se rellenan con 20, 30 y 40 cm de Arena sílica lavada y seca, se hizo pasar lixiviado tratado y estabilizado por el medio poroso a una a un flujo de 1.7 ml/s, tomando muestras a los 40,75, 115, 165 y 235 segundos para cada columna y se midió la eficacia para la remoción estos metales pesados y se encontró una reducción significativa de estos contaminantes que va desde el de 76 a 93 % para el Níquel, de 44 al 81 % en el caso del Cromo hexavalente y desde 65 hasta el 92 % para el Zinc para un tiempo máximo de 235 segundos, lo que indica que este material puede ser utilizado en la remediación de lixiviados.

Palabras clave

Lixiviados; contaminantes; metales pesados; Barreras Reactivas Permeables; remediación; medio poroso.

Abstract

The use of Permeable Reactive Barriers as a material for the removal of heavy metals from the leachates of the Sanitary Landfills has been verified for various materials, the Silica Sand from the coasts of the municipality of Alvarado Veracruz in Mexico have the characteristics of size and composition Required to be used for this purpose, samples of leachate were collected from the Sanitary Landfill of the City of Veracruz and the concentrations of Ni, Cr⁺⁶ and Zn were determined were respectively 0.0818, 0.186 and 0.224 mg/l, three columns were built of acrylic and were filled with 20, 30 and 40 cm of washed and dried Silica Sand, treated and stabilized leachate was passed through the porous medium at a flow of 1.7 ml/s, taking samples at 40.75, 115, 165 and 235 seconds for each column and the efficiency for the removal of these heavy metals was measured and a significant reduction of these pollutants was found, ranging from 76 to 93%. for Nickel, from 44 to 81 % in the case of hexavalent Chromium and from 65 to 92% for Zinc for a maximum time of 235 seconds, which indicates that this material can be used in the remediation of leachate.

Keywords

Leachates; contaminants; heavy metals; Permeable Reactive Barriers; remediation; porous médium.

- 1 Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Veracruz, Veracruz, México. [manuel.sm@veracruz.tecnm.mx, <https://orcid.org/0000-0002-5595-0914>]
- 2 Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Veracruz, Veracruz, México. [bertha.eg@veracruz.tecnm.mx, <https://orcid.org/0000-0002-8543-3520>]
- 3 Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Veracruz, Veracruz, México. [benigno.om@veracruz.tecnm.mx, <https://orcid.org/0000-0001-5211-9175>]
- 4 Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Veracruz, Veracruz, México. [L19020931@veracruz.tecnm.mx, <https://orcid.org/0000-0002-6570-9307>]

1. Introducción

Los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) conocidos como basura o desechos se generan en los hogares como resultado de las actividades domésticas, comerciales y de servicios públicos y están compuestos por productos de consumo, así como sus envases, empaques o embalajes entre los que se encuentran componentes orgánicos como el papel, el cartón, la madera, restos alimenticios e inorgánicos como el vidrio, el plástico y los metales (SEMARNAT, 2017). Cuando los R.S.U son dispuestos de manera inadecuada contaminan el aire, el agua y el suelo, ya que debido a que su descomposición se generan gases como el dióxido y el monóxido de carbono, el metano y el ácido sulfhídrico que en conjunto son denominados biogases; compuestos orgánicos volátiles como hidrocarburos aromáticos policíclicos, dioxinas, furanos y un líquido altamente tóxico denominado lixiviado (Kaza et al., 2018; Vian Perez et al., 2019), estos componentes impactan a la salud humana y representan un problema ambiental a nivel mundial (Iqbal et al., 2020),

Los lixiviados de los sitios de disposición final de los R.S.U se generan como consecuencia de la percolación del agua de lluvia a través de los residuos (Kankanige et al., 2019) y consisten en una serie de contaminantes cuya composición varía mucho dependiendo de las características específicas del lugar, de la etapa de degradación, la variación climática, del tipo de desechos y las instalaciones para la disposición (Macaulay et al., 2018) entre estos los más peligrosos son los metales pesados que se acumulan en el suelo y en el agua subterránea (Raisi et al., 2014).

Los metales pesados generan una gran cantidad de problemas ambientales y su presencia aún en nivel de trazas representan serios problemas para la salud y el entorno, ya que al entrar al suelo reducen su fertilidad y humedad y de manera genérica en el agua produce cambios patológicos en los órganos internos del cuerpo humano (Youcal, 2018) el Cr^{+6} es altamente tóxico, soluble y altamente móvil en corrientes hídricas (Dognani et al., 2019), cuando se oxida a Cr^{+3} en los organismos ocasiona mutaciones genéticas (Peralta Videa et al., 2009); el Níquel produce modificaciones en los genes y alteraciones en el metabolismo celular, así como daño en el ADN (Denkhaus y Salnikow, 2002), el Zinc produce clorosis y crecimiento reducido en las plantas ya que actúa inhibiendo la fijación de CO_2 (Haslett et al., 2001).

Una técnica *in situ* que se ha utilizado para el tratamiento de las aguas subterráneas contaminadas y que consiste en interceptar una corriente de agua a fin de reducir o transformar los contaminantes presentes entre los que se encuentran los metales pesados (Maitra, 2019) son las Barreras reactivas permeables (Striegel et al., 2001), cuya principal ventaja sobre otros métodos de remediación es principalmente que su funcionamiento depende de solo la barrera, que es una instalación que no requiere de energía y de muy poca mano de obra, ya que es el mismo flujo del agua quien hace que se pongan en contacto los contaminantes con los medios reactivos (Liu et al., 2011). En las barreras reactivas permeables los mecanismos de eliminación de los contaminantes son por inmovilización de especies químicas o mediante transformaciones a productos menos nocivos (Scherer et al., 2000), en una serie de procesos fisicoquímicos y biológicos, entre los primeros se encuentran la adsorción sin alterar el estado químico, oxidoreducción y precipitación química y por medio de procesos biológicos donde se biodegradan componentes orgánicos (Kankanige et al., 2019).

Los principales materiales que se han probado como barreras reactivas permeables han sido las Zeolitas, tanto de forma natural o modificada con hierro, la apatita, el caolín y bentonita (Vukojević et al., 2017), las cenizas de carbón, caolinita, cáscara de coco (Asokbunyarat et al.,

2017), Pirita, Hierro Granular (Maitra, 2019), las arcillas (Segura et al., 2015), cuyas características como material de relleno permitan una adecuada capacidad de adsorción, selectividad en la remoción, la naturaleza de la degradación entre otros factores (Takur et al. 2020). Para la remediación de metales pesados los materiales que se han probado como relleno para Barreras reactivas permeables son las arcillas y las zeolitas que tienen una alta capacidad para el intercambio de cationes (Segura, 2015, Vukojević et al., 2017), ya que tienen una alta capacidad de intercambio de cationes dado un catión de mayor valencia (Si^{4+}) dentro de la estructura mineral (Asokbunyarat et al., 2017).

La arena sílica está formada por un átomo de Silicio y dos átomos de Oxígeno, formando una molécula de SiO_2 , la cual se recolecta directamente de bancos de préstamo y mediante la trituración, molienda y cribado obteniendo tamaño de grano requerido, este componente se ha utilizado como medio filtrante en el tratamiento de agua residual y en la potabilización del agua, se produce en mallas 10, 20 y 30 en la escala de Tyler (Susunaga-Miranda et al., 2020). En México la producción nacional de Sílice para 2015 fue de 1.7 millones de toneladas, principalmente en los estados de Veracruz (62%), Coahuila (29%), y Nuevo León (7%) (Dirección general de Desarrollo Minero, 2017).

Se ha utilizado la arena sílica como material experimental para barreras reactivas permeables a escala laboratorio para la remoción de Cadmio y Sulfuros mediante la técnica de Hierro de Valencia Cero a fin de oxidar estas especies químicas a productos inertes o menos contaminantes (Takur et al., 2020), para metales pesados solo se ha estudiado este componente mezclado con otras especies químicas (Mohan y Gandhimathi, 2009). En México, se ha comprobado que arcillas modificadas o activadas las cuales han presentado eficiencias en la remoción de Cr^{+6} hasta del 95.37 % en el control de lixiviados de tiraderos a cielo abierto (Segura et al., 2015).

La arena sílica proveniente de las costas del municipio de Alvarado, Veracruz, México como material para Barreras reactivas permeables se ha determinado que cuenta con una alta estabilidad química por su contenido de Fe_2O_3 , posee diámetros homogéneos que permiten una mayor permeabilidad sin una degradación del material (Susunaga-Miranda et al., 2020), además de que el silicio cuenta con una estructura donde los contaminantes pasan por el medio poroso y son permeados con el agua donde los cationes intercambiables son adsorbidos y atrapados en este sistema de retención (Mohan y Gandhimathi, 2009).

Este documento tiene por objetivo probar la capacidad de la arena sílica proveniente de las Costas del municipio de Alvarado, Veracruz, México para la remediación de metales pesados (Cr^{+6} , Ni y Zn) de los lixiviados provenientes del Basurero No Controlado de la Ciudad de Veracruz, en medio controlado utilizando columnas empacadas verticales como material para una Barrera Reactiva Permeable.

2. Metodología

a) El relleno sanitario de la ciudad de Veracruz, Veracruz, México

El relleno sanitario de la ciudad de Veracruz, fue una obra de infraestructura para la disposición de Residuos Sólidos Urbano, clausurado desde diciembre de 2019 por las autoridades ambientales del Gobierno del Estado de Veracruz y que se localiza al norte del municipio de Veracruz en

terrenos de la Administración Portuaria Integral (Susunaga y Estévez, 2018) en las coordenadas 19°13'56.98"N y 96°13'22.11"O.

El sitio de recolección de muestras de lixiviado se estableció dentro del polígono del relleno sanitario clausurado de la ciudad de Veracruz en un canal por el cual los lixiviados escurren hacia una pequeña presa de captación cuyo cauce conduce al río Grande.

Figura 1. Localización del relleno sanitario de la ciudad de Veracruz, México



Fuente: Google Earth, Modificado por Estévez-Garrido.

b) Colecta, preservación y caracterización de los lixiviados

Se recolectaron muestras de lixiviado del Basurero No Controlado de la ciudad de Veracruz y se preservaron de conformidad con la Norma Mexicana NMX-AA-003-1980, (DOF, 1980) para el muestreo de aguas residuales. Las muestras fueron colectadas en envases de polietileno previamente lavados con HNO_3 al 10 % y con abundante agua desionizada y transportaron al laboratorio de Físicoquímica del Instituto Tecnológico de Veracruz (ITVer) refrigerándose a una temperatura de $\pm 4^\circ\text{C}$ como medio de preservación (Susunaga Miranda y Estévez Garrido, 2018).

Las muestras de lixiviado se filtraron con carbón activado para eliminar la interferencia de colores, las lecturas de los metales Ni, Zn, Cr^{+6} se realizaron con un Fotómetro Hanna HI83300 el cual trabaja en cuatro longitudes de onda de la luz (420 nm, 525 nm, 575 nm y 610 nm) y que mide y traza su propia curva de concentración contra absorbancia y como reactivos estándares CAL Check para validar el rendimiento del sistema. Todas las muestras se leyeron por triplicado (Susunaga Miranda y Estévez Garrido, 2018).

Figura 2. Muestras de Lixiviado del Basurero No controlado de la ciudad de Veracruz



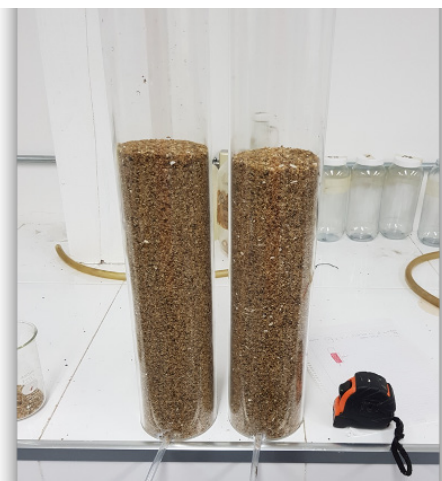
c) Colecta y tratamiento del material permeable

La arena sílica se colectó en el mes de julio de 2020 del banco costero propiedad de la empresa Sílices de México en el Km 55 + 500 Carretera Federal 180 Tramo Alvarado-Lerdo, en la congregación de Chocotán en el municipio de Alvarado, Veracruz, el cual fue secado con un horno rotatorio con quemador con atomizador para eliminar humedad (Susunaga Miranda et al., 2020), este material fue llevado al Laboratorio de Físico-Química del Instituto Tecnológico de Veracruz donde se tamizó hasta un tamaño de partículas de 0.707 mm por medio de una malla 25 en la Escala de Tyler.

d) Columnas horizontales de prueba

Se construyeron tres columnas de acrílico de 10 centímetros de diámetro y 50 centímetros de alto, con una salida para el material acuoso en el fondo de la columna para drenar los lixiviados, se rellenaron con 20, 30 y 40 centímetros de Arena sílica libre de humedad y con tamaño estándar de 0.707 mm (Figura 3).

Figura 3. Columnas empacadas con arena sílica



e) Ensayos para la remoción de metales pesados

Las tres muestras de lixiviados se mezclaron para tener una sola con características homogéneas, de esta mezcla se separaron 300 ml en tres vasos de precipitado de 100 ml y se agregaron uno a uno en cada columna con 20 cm de arena sílica, se tomó el tiempo que tardó en pasar por la columna el lixiviado en cada ocasión, para determinar la velocidad y el caudal de salida; al lixiviado recolectado después de pasar por la columna se le determinó el volumen y la concentración de Cr⁺⁶, Ni y Zn para calcular la saturación de líquido y la remoción del contaminante. Este procedimiento se repitió con 30 y 40 cm de relleno de arena sílica en las columnas.

f) Análisis de resultados

Para el análisis de los datos obtenidos se aplicaron pruebas de análisis de medias de Tukey y Fisher con un nivel de confianza del 95 %, con el programa MINITAB con el fin de encontrar el error estándar de la media tabular y las diferencias mínimas estadísticas de los datos obtenidos en los resultados del laboratorio.

Los resultados se graficaron y se realizó un análisis comparativo al 95 % de confianza con las variables de altura, eficiencia de remoción de contaminantes.

3. Resultados

Metales pesados en lixiviados del relleno sanitario de la ciudad de Veracruz

Los muestreos para los tres metales pesados se llevaron a cabo en diciembre de 2019 en el basurero no controlado de la ciudad de Veracruz en tres envases diferentes de un litro cada uno, se preservaron y se realizó un análisis de Cr⁺⁶, Ni y Zn en el Laboratorio de Físicoquímica del Instituto Tecnológico de Veracruz obteniéndose los siguientes resultados (Tabla 1).

Tabla 1. Resultados obtenidos por cada muestra

Parámetro	Muestra 1 (mg/l)			Muestra 2 (mg/l)			Muestra 3 (mg/l)		
Ni	0.084	0.080	0.081	0.082	0.082	0.083	0.082	0.081	0.082
Zn	0.190	0.190	0.200	0.190	0.190	0.180	0.180	0.180	0.180
Cr ⁺⁶	0.230	0.230	0.220	0.230	0.230	0.240	0.210	0.210	0.220

La media de las concentraciones de Níquel, Zinc y Cromo hexavalente son respectivamente 0.0818, 0.186 y 0.224 mg/l, si bien estas concentraciones no rebasan los límites permisibles de conformidad con la NOM-001-SEMARNAT-1996, (2.0, 10.0 y 0.5 mg/l) para descargas en humedales naturales (DOF, 1997) como es el caso del relleno sanitario de la ciudad de Veracruz.

Los resultados de las pruebas de análisis de medias de Tukey y Fisher con un nivel de confianza del 95 %, con el programa MINITAB demostraron que no existen diferencias significativas entre los datos obtenidos para la concentración de Cr⁺⁶, Ni y Zn en los lixiviados procedentes del Relleno Sanitario de la Ciudad de Veracruz, Veracruz, México.

Tiempo de residencia, caudal y tiempo de saturación hidráulica

Al añadir el lixiviado recolectado y estabilizado en las columnas de acrílico con arena sílica, se pudo observar que el tiempo que tardaba el líquido en fluir a través del medio variaba con el espesor del relleno, así se pudo calcular el caudal, también se pudo observar que en determinado momento se presentaba la saturación hidráulica, es decir, el punto en el cual el medio ya no impedía el paso libre de la muestra (ya no presentaba retención de lixiviado en su interior), los datos obtenidos se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Caudal, velocidad y tiempo de saturación de lixiviado en la arena sílica

Espesor de la Columna	Caudal (ml/s)	Velocidad (m/s)	Tiempo de Saturación (s)
20 cm	1.7	0.563	245
30 cm	0.8	0.551	288
40 cm	0.4	0.539	360

Como se muestra en la tabla 2, el caudal que fluye a través de las columnas varía con el espesor, a mayor espesor, menor caudal y mayor tiempo de saturación.

Los resultados de las pruebas de análisis de medias de Tukey y Fisher con un nivel de confianza del 95 %, con el programa MINITAB demostraron que existen diferencias significativas entre los datos obtenidos para la velocidad, el caudal y el tiempo de saturación de los lixiviados procedentes del Relleno Sanitario de la Ciudad de Veracruz, Veracruz, México en las columnas de 20,30 y 40 cm de arena sílica, sin embargo la diferencia estadística más amplia se presenta entre la columna de 20 cm y la de 40 cm, lo que supondría que con esos resultados se podría proponer el ancho específico para su uso en barreras reactivas permeables.

Remoción de Cr⁺⁶, Ni y Zn en columnas empacadas de arena sílica

Se tomaron muestras de lixiviado una vez que los contaminantes recorrieron el empaque de arena sílica en las columnas de 20, 30 y 40 cm a los 40, 75, 115,165 y 235 segundos de iniciar el ensayo experimental, se dividieron en tres y se determinó la concentración de Níquel, Zinc y Cromo hexavalente, este procedimiento se repitió nueve veces para cada columna y los resultados que arrojaron en porcentaje de remoción se tabularon y graficaron para obtener una tendencia lineal por contaminante en cada una de las columnas en los tiempos seleccionados.

a) Remoción de Níquel

El resultado de la eficiencia en la remoción de Níquel se obtuvo de promediar cada una de las tres muestras que se colectaron para un tiempo determinado (Tabla 3), el número total de ensayos que se realizaron para este metal pesado fueron de 15 para cada columna, con una concentración inicial de 0.0818 mg/l.

Tabla 3. Eficiencia de remoción de Níquel

tiempo (s)	Concentración (mg/l)			Eficiencia		
	Columna de 20 cm	Columna de 30 cm	Columna de 40 cm	Columna de 20 cm	Columna de 30 cm	Columna de 40 cm
40	0.0041	0.0017	0.0012	95.0 %	97.8 %	98.5 %
75	0.0082	0.0041	0.0032	90.0 %	95.0 %	96.1 %
115	0.0164	0.0053	0.0036	80.0 %	93.5 %	95.6 %
165	0.0196	0.0098	0.0057	76.0 %	88.0 %	93.0 %
235	0.0286	0.0139	0.0082	65.0 %	83.0 %	90.0 %

Como se puede observar en la figura 4, a medida que se incrementa el ancho de la columna, el porcentaje de remoción se mantiene en niveles superiores al 90 %. De esta manera, se pueden graficar los valores para obtener las tendencias generales de remoción con el objetivo de poder proyectar estadísticamente el comportamiento de la remoción de Níquel si se cuenta con un mayor ancho de barrera.

b) Remoción de Cr^{+6}

Para el caso del Cromo también se realizaron el mismo número de ensayos iniciando con una concentración de 0.224 mg/l, obteniendo los promedios de la remoción los que se muestran en la tabla 4.

Figura 4. Eficiencia en la remoción de Níquel en Barreras de arena sílica de 20, 30 y 40 cm a flujo constante

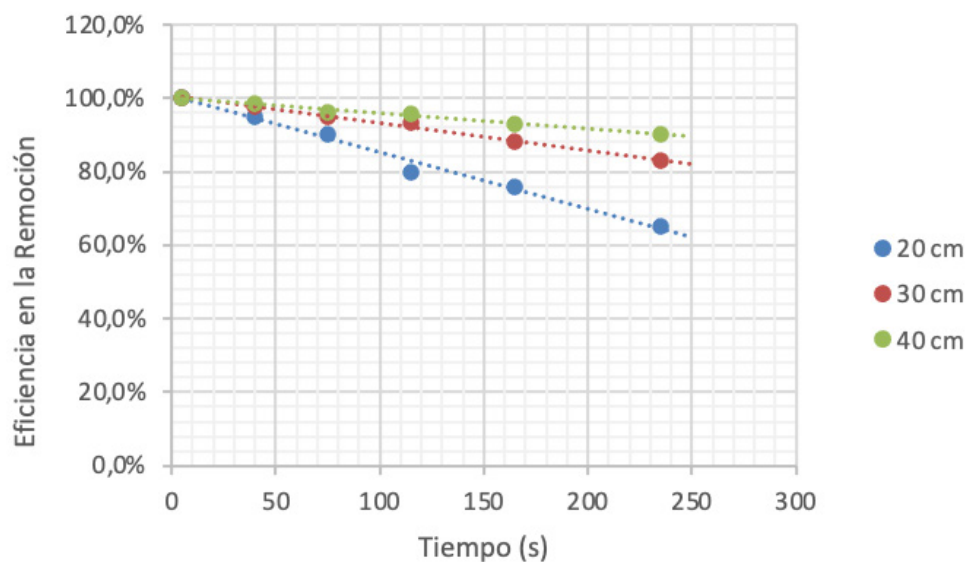
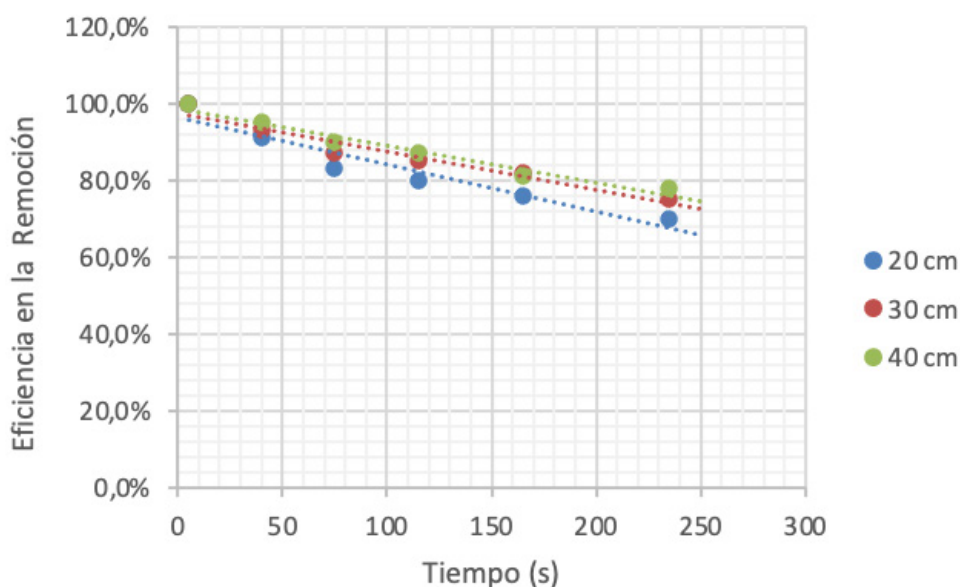


Tabla 4. Eficiencia de remoción de Cromo

tiempo (s)	Concentración (mg/l)			Eficiencia		
	Columna de 20 cm	Columna de 30 cm	Columna de 40 cm	Columna de 20 cm	Columna de 30 cm	Columna de 40 cm
40	0.0241	0.0157	0.0112	91.0%	93.0 %	95.0 %
75	0.0380	0.0291	0.0224	83.0%	87.0 %	90.0 %
115	0.0448	0.0336	0.0291	80.0%	85.0 %	87.0 %
165	0.0537	0.0403	0.0425	76.0%	82.0 %	81.0 %
235	0.0672	0.0560	0.0493	70.0%	75.0 %	78.0 %

En la figura 5 podemos observar que el comportamiento de la remoción de Cr^{+6} es diferente a la del níquel, este comportamiento, aunque similar para las tres columnas presenta un decaimiento más abrupto.

Figura 5. Eficiencia en la remoción de Cr^{+6} en Barreras de arena sílica de 20, 30 y 40 cm a flujo constante

El comportamiento en la remoción de Cromo permite identificar que existe una diferencia fundamental entre los resultados obtenidos y los que se han reportado en la literatura.

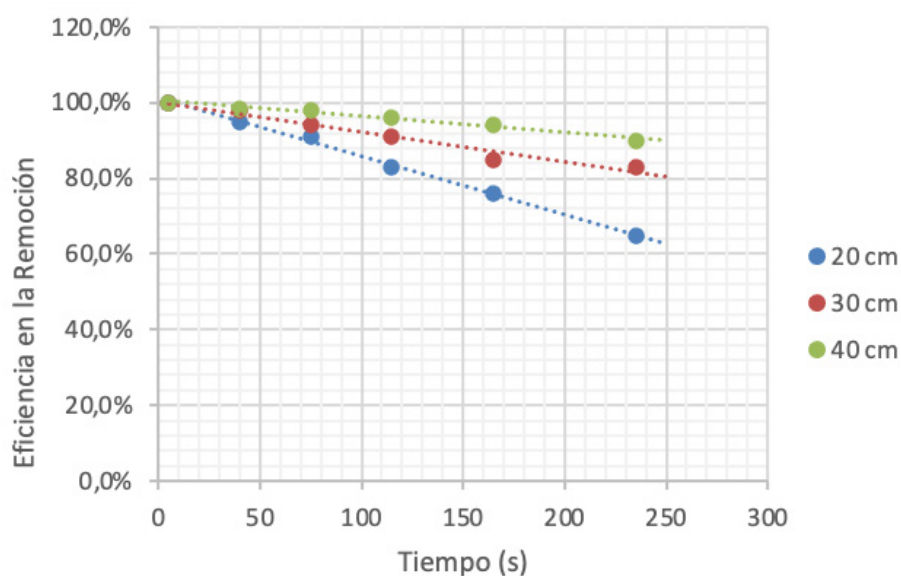
b) Remoción de Zn

Los resultados de la eficiencia de remoción de Zinc en las columnas de 20, 30 y 40 cm se presentan en la tabla 5 a partir de una concentración inicial de 0.186 mg/l.

Tabla 5. Eficiencia de remoción de Zinc

tiempo (s)	Concentración (mg/l)			Eficiencia		
	Columna de 20 cm	Columna de 30 cm	Columna de 40 cm	Columna de 20 cm	Columna de 30 cm	Columna de 40 cm
40	0.0093	0.0041	0.0028	95.0 %	97.8 %	98.5 %
75	0.0167	0.0111	0.0037	91.0 %	94.0 %	98.0 %
115	0.0316	0.0167	0.0074	83.0 %	91.0 %	96.0 %
165	0.0446	0.0279	0.0111	76.0 %	85.0 %	94.0 %
235	0.0595	0.0316	0.0186	68.0 %	83.0 %	90.0 %

En cuanto a la remoción de Zinc que se determinó en el ensayo, se puede apreciar (Figura 6) que la disminución en la concentración de este contaminante es relativamente constante y en valores más altos que los que se obtuvieron con el Cromo hexavalente y el Níquel.

Figura 6. Eficiencia en la remoción de Zinc en Barreras de arena sílica de 20, 30 y 40 cm a flujo constante

4. Discusión

Los resultados obtenidos de la concentración de Níquel, Cromo hexavalente y Zinc en la corriente de lixiviados que emana del Relleno Sanitario clausurado de la Ciudad de Veracruz, si bien no sobrepasan los niveles máximos establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF, 1997), representan una disminución de aproximadamente de 1.44 y 2.6 % para el Níquel y Cromo hexavalente respectivamente y un incremento del 1.6 % para el Zinc con respecto al año 2018 que reportaron 0.083, 0.186 y 0.23 mg/l (Susunaga Miranda y Estévez Garrido, 2018), lo que significa que estos contaminantes continúan estando presentes en el canal de lixiviados el cual descarga al río Grande y desemboca en el Golfo de México representando aún un foco importante de

aporte de metales pesados al Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano lo que representa un importante impacto ambiental (Botello et al., 2005).

Pruebas realizadas en columnas para reducir la concentración de Níquel en ensayos experimentales utilizando 50 cm de columna durante tiempos de residencia cercana a 2500 segundo utilizando lapilli de piedras volcánicas de 2 a 62 mm presentó una eficiencia del 98 %, disminuyendo hasta 63 % en 100 h (Madaffari et al., 2017), por lo que se esperaría de acuerdo con la tendencia presentada en la gráfica 1 que al aumentar el espesor de la barrera, la eficiencia en la remoción se incrementa y que esta se mantenga por mayor tiempo, ya que el proceso de adsorción que es el que sucede con el níquel por lo general por atracción electrostática de los metales por el relleno (Kumar et al., 2020).

Comparando los resultados relativos a la remoción de Cromo hexavalente en la Arena sílica con mezclas de Arena/Zeolitas son prácticamente similares, ya que en este caso la reducción del contaminante se ha presentado desde el 84 % al 89.7 % en condiciones controladas y con reactivos estandarizados (Maamoun et al., 2020) se puede establecer este material es ligeramente más eficaz en el tratamiento de este metal pesado.

La tendencia en la remoción de Zinc en el ensayo experimental en columnas de 30 y 40 cm es muy similar a las reportadas en barreras con relleno de hierro que fue de entre 96 y 99 % (Takur et al., 2020), estos valores se aproximan a los presentados con material reactivo en partículas de 2 a 3 mm (Pérez, 2014).

El componente fundamental de la Arena sílica es el Silicio, el cual tiene una estructura que permite que los cationes intercambiables sean absorbidos y que los metales sean atrapados vía intercambio iónico lo que permite que este sistema los retenga (Mohan y Gandhimathi, 2009)

Los principales factores para que un material sea utilizado como Barrera Reactiva Permeable es que debe ser compatible con el medio ambiente del subsuelo, es decir, no debe provocar reacciones adversas o causar algunas especies químicas que generen más contaminantes (Maitra, 2019; Mital et al., 2020), además de tener una alta disponibilidad para realizar trabajos de remediación de acuíferos al atenuar los metales pesados en condiciones de control y así evitar que los lixiviados de los rellenos sanitarios migren (Cordeiro y Viera, 2020), lo cual puede aportar la arena de sílice tanto de la cuenca baja del río Papaloapan (Díaz et al., 2018) como de las costas del municipio de Alvarado Veracruz, México (Susunaga Miranda et al., 2020).

5. Conclusiones y recomendaciones

Con los resultados de la concentración de metales presentes en los lixiviados y su comparación con estudios realizados anteriormente podemos concluir que el Relleno Sanitario de la ciudad de Veracruz, se encuentra en una fase de envejecimiento, ya que la emisión de contaminantes se encuentra en pleno proceso de disminución, sin embargo, aún se deben de realizar obras para impedir que los componentes tóxicos migren hacia las aguas del Golfo de México.

El uso de las Barreras reactivas permeables ha evolucionado en los últimos años, su uso para el tratamiento de lixiviados mediante la adsorción de los contaminantes o la conversión en especies químicas menos tóxicas se basan en el paso de una corriente líquida en el seno de un empaque o relleno de materiales de alta permeabilidad que permite que los contaminantes sean retenidos o se convierten en productos químicos con menos toxicidad o con alta biodegradabilidad, esta técnica ofrece una serie de ventajas que permiten su uso, entre ellas se encuen-

tra el hecho de que no necesitan energía para su operación y que los materiales reactivos por su abundancia, su costo y su reducido impacto ambiental.

El comportamiento en la remoción de metales pesados por las Barreras reactivas permeables de arena sílica procedente de las costas del municipio de Alvarado, Veracruz, México, es muy diferente para cada uno de los contaminantes estudiados, ya que, si bien la reducción más alta se presenta en las columnas de 40 cm, el valor en la disminución de la concentración cambia, el Níquel y el Zinc presentan tendencias similares pero el Cromo difiere de los dos anteriores, tomando esto como criterio de selección de la arena sílica.

Es probable que la baja remoción de Cromo se deba a que las muestras se lavaron previamente y se eliminó la presencia de Hierro y es precisamente este componente con el que interactúa para su descomposición a Cr^{+3} ya que se tiene una menor concentración de este elemento en la arena sílica estudiada.

Un factor muy importante para que se dé una remoción adecuada de metales pesados en las Barreras reactivas permeables es el tiempo de residencia, es decir, el tiempo que permanecen las especies químicas presentes en los lixiviados en contacto con el material de relleno, ya que de esta depende la cinética de la eliminación por parte del medio reactivo, y con los resultados obtenidos nos permiten proyectar la saturación hidráulica de la arena sílica que es en ese momento que se alcanza una remoción estandarizada y a partir de la cual comienza el decaimiento en la eficiencia final.

Con los resultados obtenidos se puede demostrar que la arena sílica es una alternativa que se puede utilizar como Barrera Reactiva Permeable, ya que posee características de porosidad, permeabilidad, tamaño y estructura química que le permiten remover contaminantes como los metales pesados presentes en los lixiviados del relleno sanitario de la Ciudad de Veracruz, México, ya que esta no interactúa con otros componentes y es un material de fácil recolección, el cual es utilizado para varios fines industriales y proviene principalmente de las costas del Municipio de Alvarado, lugar donde se concentra una buena parte de las empresas que proveen este material a la zona central de México.

Como recomendación podemos proponer que se deben de realizar ensayos para determinar parámetros como conductividad hidráulica y permeabilidad de la arena sílica para perfeccionar el conocimiento de este material para su uso como barrera reactiva permeable para la remoción de metales pesados de los lixiviados de los rellenos sanitarios.

Referencias

- Asokbunyarat, V., Lens, P., y Annachhatre A. (2017). Chapter 3 Permeable Reactive Barriers for Heavy Metal Removal. *Sustainable Heavy Metal Remediation*, Environmental Chemistry for a Sustainable World 8, Rene, E.R., Sahinkaya, E., Lewis, A., Lens, P. (Eds.). Volume 1: Principles and Processes: 65-100. https://doi.org/10.1007/978-3-319-58622-9_3
- Botello, A., Rendón von Osten, J., Gol-Boucht, G., y Agraz Hernández, C. (2005). *Golfo de México. Contaminación e impacto ambiental: Diagnóstico y tendencias*. 2da edición.
- Cordeiro Andrade, D., y Vieira dos Santos, E. (2020). Combination of electrokinetic remediation with permeable reactive barriers to remove organic compounds from soils, *Current Opinion in Electrochemistry*, 22: 136-144. <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2020.06.002>
- Denkhaus, E., y Salnikow, K. (2002). Nickel essentiality, toxicity, and carcinogenicity. *Critical Reviews in Oncology/Hematology*, 42(1): 35-56. [https://doi.org/10.1016/S1040-8428\(01\)00214-1](https://doi.org/10.1016/S1040-8428(01)00214-1)

- Díaz, M., Campos, R., Zamora, S., y Salgado, R. (2018) Cuantificación experimental del contenido masivo de SiO₂ en depósitos eólicos de arena en una región de la cuenca del río Papaloapan, Veracruz, México. *Ingeniería Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán*, 22(1). <https://bit.ly/3d4vnpp>
- Dirección General de Desarrollo Minero (2017). Perfil del mercado del Sílice, Secretaría de Economía, Gobierno de México. <https://bit.ly/3qjX6lf>
- DOF, 1980 Norma Mexicana NMX-AA-003-1980 Aguas Residuales, Muestreo, Diario Oficial de la Federación 25 de marzo de 1980. México D.F.
- DOF, 1997 Norma Oficial Mexicana 001-SEMARNAT-1996 Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Diario Oficial de la Federación 6 de enero de 1997. México D.F.
- Dognani, G., Hadi, P., Ma, H., Cabrera, F. C., Job, A. E., Agostini, D.L.S., y Hsiao, B. S. (2019). Effective chromium removal from water by polyaniline-coated electrospun adsorbent membrane. *Chem. Eng. J.*, 372: 341-351. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.04.154>
- Haslett, B., Reid, R., y Rengel, Z. (2001). Zinc mobility in wheat: Uptake and distribution of zinc applied to leaves or roots. *Annals of Botany - ANN BOT.*, 87: 379-386. <https://doi.org/10.1006/anbo.2000.1349>
- Iqbal, A., Liu, X., y Chen, G. H. (2020). Municipal solid waste: Review of best practices in application of life cycle assessment and sustainable management techniques. *Science of The Total Environment*, 138622. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138622>
- Kankanige, D., Dayanthi, W., Nagasinghe, I., Disanayaka, A., y Kawamoto, K. (2019). Low-Cost Permeable Reactive Barrier (PRB) System to treat the organic compounds and nutrients in the groundwater contaminated by the landfill-leachate. *Engineer: Journal of the Institution of Engineers, Sri Lanka*, 52: 15. <https://doi.org/10.4038/engineer.v52i2.7350>
- Kaza, S., Yao, L., Bhada Tata, P., y VanWoerden, F., (2018). What a Waste 2.0. World Bank, Washington, DC. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>
- Liu S., Li X., y Wang H. (2011). Hydraulics analysis for groundwater flow through permeable reactive barriers. *Environmental Modeling & Assessment*, 16(6): 591-598. <https://doi.org/10.1007/s10666-011-9268-0>
- Maamoun, I., Eljamal, O., Falyouna, O., Eljamal, R., y Sugihara, Y. (2020) Multi-objective optimization of permeable reactive barrier design for Cr(VI) removal from groundwater. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 200 <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110773>
- Macaulay, B., Aderibigbe, A., y Ogunwole, G. (2018). *Novel eco-friendly mitigation strategies for managing oil spills and municipal waste dump site leachates*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48281-1_110-1
- Madaffari, M., Bilardi, S., Calabrò, P., y Moraci N. (2017). Nickel removal by zero valent iron/lapillus mixtures in column systems. *Soils and Foundations*, 57(5): 745-759. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2017.08.006>
- Maitra, S. (2019). Permeable reactive barrier: a technology for groundwater remediation. A mini review. *Research Journal of Life* 5(1): 203 <http://doi.org/10.26479/2019.0501.21>
- Mittal, A., Singh, R., Chakma, S., Gaurav, G. (2020). Permeable reactive barrier technology for the remediation of groundwater contaminated with nitrate and phosphate resulted from pit-toilet leachate, *Journal of Water Process Engineering*, 37. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101471>
- Mohan, S., Gandhimathi, R. (2009). Removal of heavy metal ions from municipal solid waste leachate using coal fly ash as an adsorbent. *J Hazard Mater*, 169(1-3): 351-359 <http://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.03.104>
- Peralta Videa, J., Lopez, M., Narayan, M., Saupe, G., y Gardea Torresdey, J. (2009). The biochemistry of environmental heavy metal uptake by plants: implications for the food chain. *Int J Biochem Cell Biol.*, 41(8-9):1665-77, Aug-Sep. <https://doi.org/10.1016/j.biocel.2009.03.00>

- Pérez Espinosa, V. (2014). *Inmovilización de elementos potencialmente tóxicos en zonas mineras abandonadas mediante la construcción de tecnosoles y barreras reactivas permeables*. Memoria presentada para optar al grado de Doctor en Ingeniería Química por la Universidad de Murcia, España.
- Raisi, S., Sulaiman, H., Suliman, F., y Abdalla, O. (2014). Assessment of Heavy Metals in Leachate of an Unlined Landfill in the Sultanate of Oman. *International Journal of Environmental Science and Development*, 5(1). <https://doi.org/10.7763/IJESD.2014.V5.451>
- Scherer, M., Richter, S., Valentine, R., Alvarez, P. (2000). Chemistry and microbiology of permeable reactive barriers for in situ groundwater clean up. *Crit Rev Microbiol.*, 26(4): 221-64. <https://doi.org/10.1080/10408410091154237>
- Segura, R., Martínez, G., Apolinar, J., y García, M., (2015) Remoción de Cr6+ de lixiviados de tiraderos de basura con arcillas modificadas o activadas. *CienciaUANL*, 18(75): 54-70.
- SEMARNAT (2017). Residuos sólidos urbanos y de manejo especial, acciones y programas. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://bit.ly/3xHkBNH>
- Susunaga Miranda M. A., y Estévez Garrido B. M (2018). Metales pesados en los lixiviados provenientes del basurero no controlado de la ciudad de Veracruz. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 5(6): 164-171.
- Susunaga Miranda, M. A., Estévez Garrido, B. M., y Susunaga Estévez, R. M. (2020). Characteristics of Silica Sand from Alvarado, Veracruz, Mexico as material for permeable reactive barriers for the remediation of aquifers contaminated with leachates from uncontrolled landfills. *Enfoque UTE*, 11(4): 87-100. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v11n4.674>
- Striegel, J., Sanders, D., y Veenstra, J. (2001). Treatment of contaminated groundwater using permeable reactive barriers. *Environmental Geosciences*, 8(4): 258-265. <https://doi.org/10.1046/j.1526-0984.2001.84004.x>
- Thakur, A., Vithanage, M., Das, B., y Kumar, M. (2020). A review on design, material selection, mechanism, and modelling of permeable reactive barrier for community-scale groundwater treatment. *Environmental Technology & Innovation*, 19. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100917>
- Vian Pérez, J., Velasco Pérez, A., y García Herrera, T. (2019). Residuos sólidos urbanos. Una problemática ambiental y oportunidad energética. *CIENCIA UANL*, 22(97). <https://bit.ly/2Uk7QdA>
- Vukojević, N., Daković, A., Ugrina, M., Trgo, M., Nuić, I., y Marković, M., (2017). Evaluation of low-cost sorbent as potential materials for In-Situ remediation of water contaminated with heavy metals. *Technologica Acta*, 10(2): 9-13. <https://bit.ly/3zYYhkS>
- Youcal, Z. (2018) Chapter 1. Leachate generation and characteristics. Zhao Youcal (Ed.), *Pollution control technology for leachate from municipal solid waste* (pp.1-30). Butterworth-Heinemann. <https://bit.ly/3zOBtnK>