

RESERVA DE DERECHOS AL USO EXCLUSIVO DE TITULO No. 04-2018-070614032000-203

VIGENCIA 06/07/2021 A 06/07/2022

ACTUALIZACIÓN 13/12/2021

ISSN 2594-1925

a cargo de la FCITEC



RECIT

REVISTA DE CIENCIAS TECNOLÓGICAS

VOLUMEN 5 CAPÍTULO 3

ISSN: 2594-1925



FCITEC
Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología
Unidad Valle de las Palmas

2022
Julio-Septiembre



Weibull strength distribution and reliability S-N percentiles for tensile tests

Análisis de resistencia Weibull para los percentiles S-N y su nivel de confiabilidad en test de tensión

Manuel Baro Tijerina¹ , Manuel Román Piña Monarrez² , Jesús Barraza Contreras² 

¹Industrial and Technology Department, Instituto Tecnológico Superior de Nuevo Casas Grandes, Casas Grandes, México

²Industrial and Manufacturing Department at IIT Institute, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Ciudad Juárez, México

Autor de correspondencia: Manuel Baro Tijerina, Instituto Tecnológico Superior de Nuevo Casas Grandes, Casas Grandes, México. Email: mbaro@itsncg.edu.mx. ORCID: 0000-0003-1665-8379

Recibido: 31 de Julio del 2022

Aceptado: 20 de Septiembre del 2022

Publicado: 22 de Septiembre del 2022

Abstract. - *Based on the true stress, the ultimate material's strength, and the fatigue slope b values, the probabilistic percentiles of the S-N curve of ductile materials are formulated. The Weibull β and η parameters used to determine the product's reliability are determined directly from the material's strength values corresponding to 103 and 106 cycles. And since in Table corresponding to the properties of this A538 A (b) steel and collected by table 23-A of Shigley Mechanical Engineering Design book; authors present the σ_t , S_{ut} , and b values of several materials, then the Weibull parameters for each one of these materials as well as the 95% and 5% reliability percentiles of their S-N curves are given. A step-by-step application to the steel A538 A (b) material is presented. And based on the maximum and minimum applied stress values, the corresponding Weibull stress distribution was fitted and used with the Weibull strength distribution, in the stress/strength reliability function to determine the element's reliability.*

Keywords: Mechanical design; True stress-strain; Weibull distribution; Fatigue reliability analysis; Stress/Strength, Reliability Engineering.

Resumen. - *Basado en el estrés verdadero σ_t , la última resistencia del material S_{ut} , y la curva de fatiga b , la curva S-N de material de acero dúctil es formulada. La distribución Weibull con parámetros β y η son usados para determinar la confiabilidad del elemento y ambos son directamente determinados por la resistencia del material que en este caso corresponde a 103 y 106 ciclos. Y como corresponde en la tabla de propiedades del acero A538 A (b) y recolectada esta información del libro de Ingeniería mecánica de Shigley: los autores presentan el estrés verdadero, último estrés y la curva de diferentes materiales. Entonces los parámetros Weibull β y η , así como los percentiles de confiabilidad 95 y 5 % de la curva S-N son presentados. Se presenta una aplicación paso por paso para el acero A538 A (b). Y basado en el máximo y mínimo estrés aplicado, la distribución Weibull correspondientes es presentada. Por último, basado en el máximo y mínimo estrés, la distribución Weibull correspondiente fue ajustada y usada con la resistencia de la distribución Weibull, en la función estrés-resistencia de confiabilidad con el objeto de estimar la confiabilidad del elemento.*

Palabras clave: Diseño mecánico; Estrés-resistencia; Distribución Weibull; Análisis de fatiga; Ingeniería de confiabilidad.

1. Introduction

Since the reliability of a mechanical component depends on the applied stress value and on the strength that the used material presents to overcome the applied stress, then because both the applied stress and the material's strength are random variables, then researchers have been proposing to use a probabilistic stress-cycles S-N curves. However, because the probabilistic percentiles of the S-N curves are based on the common confidence interval (CL) of the expected average, as shown in section 3.3, then the proposed formulations are inefficient to perform a reliability analysis. Thus, in this paper based on the theory given in [1], a Weibull methodology to determine the *strength distribution* and the *reliability percentiles* of the S-N curve are both given. In the proposed Weibull/tensile test methodology, the only needed inputs are 1) the ultimate material's strength [2] (S_{ut}) value, (which is a measure of the maximum stress that an object/material/structure can withstand without being elongated, stretched or pulled). 2) the true stress (σ_t) [2] value, (which measures the change in the area with respect to the time while the specimen is loading), and 3) the fatigue slope b value of the S-N curve. With these three inputs, the corresponding strength Weibull shape β and scale $\eta_{(\sigma)}$ parameters used to determine the reliability percentiles of the S-N curve, are both determined based on the $S_f = fS_{ut}$ strength value that corresponds to $N_1 = 10^3$ cycles and on the strength (S_e) value that corresponds to $N_1 = 10^6$ cycles. The validation that the addressed strength β and $\eta_{(\sigma)}$ parameters completely represent the S_f and S_e values, is demonstrated by showing that by using the β and $\eta_{(\sigma)}$ parameters we *always can* reproduce the S_f and S_e values.

And because in the Table A-23 of the Shigly's book, for several steel materials, authors present their S_{ut} , σ_t and b values, then in this paper by using the proposed methodology, their corresponding strength β and $\eta_{(\sigma)}$ parameters, the

log-mean μ_x and log-standard deviation (σ_x) values, as well as the 95% and 5% reliability percentiles of their S-N curves are all given in section 6. *The novelty* of the given reliability percentiles is that they *do not represent a confidence interval CL* of the S-N curve, instead they represent a *reliability confidence interval* for the S-N curve. But more importantly notice that because the S-N reliability percentiles are the reliability percentiles of the strength $\eta_{(\sigma)}$ parameter, then because in any Weibull analysis the reliability percentiles of $\eta_{(\sigma)}$ are always determined, then automatically we can use these $\eta_{(\sigma)}$ percentiles as the corresponding S-N percentiles. Consequently, any Weibull strength analysis can be seen as a representation of the reliability percentiles of the related S-N curve [3],[4]. Additionally, because the reliability of the component depends on the applied stress and on its strength, then in section 5, the Weibull strength parameters that represents the desired S-N reliability percentiles, and the Weibull parameters that represents the applied stress, are both used in the stress/strength methodology [5] to determine the reliability of the designed element.

The structure of the paper is as follows. Section 2 presents the generalities of a tensile test. In section 3, the steps of the proposed Weibull/Tensile/Reliability percentiles methodology are given. In section 4, a step-by-step application of the proposed method is given. In section 5, the stress/strength analysis to determine the reliability of the component is presented. In section 6 the Weibull β and $\eta_{(\sigma)}$ parameters, the 95% and 5% reliability percentiles and the corresponding log-mean and log-standard deviation for each one of the steel materials given in the Table A-23 of the Shigly's book are provided. Finally, in section 7, the conclusions are presented.

2. Tensile Test Generalities

In general, in a tensile test the material properties are directly measured from a sample that is tested at controlled tension force (F) until failure. The most general material's properties [2] are the ultimate tensile strength S_{ut} , (it is a measure of the maximum stress that an object/material/structure can withstand without being elongated, stretched or pulled), the true stress σ_t , (it measures the change in the area with respect to time while the specimen is loaded), the maximum elongation (L), and the reduction in the initial area (A_0).

Since these material's properties are random variables, then in the analysis a probability density function (*pdf*) must be used [6] pg.10. In the analysis, the most used *pdfs* are the normal, lognormal and Weibull distributions. Fortunately, as demonstrated in [7], for mechanical stress the best distribution is the Weibull distribution, and from [1] we have that from the Weibull analysis we always can reproduce the analyzed principal stresses (or strength) values. Therefore, in this paper the Weibull distribution is used. Also notice that for $\beta \approx 3.4$ the Weibull distribution efficiently mimics the normal distribution, and for $\beta > 5$ [8], it efficiently mimics the lognormal distribution.

However, before showing the Weibull distribution completely reproduce the used material's strength values, let first present the generalities of a tensile test formulation.

2.1 General Tensile Test Formulation

In a tensile test analysis, by defining the engineering stress value as $\sigma = F/A_0$, and the engineering strain value as $\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L-L_0}{L_0}$ where F is the applied force, A_0 is the initial area of the tested element, and L_0 is the initial length, and L is the final elongation of the tested element (see Fig.1).

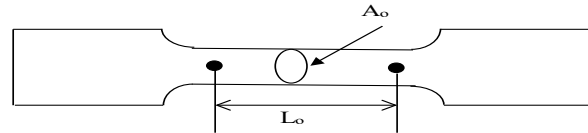


Figure 1. Test Specimen. Source: The Authors

The relationships among the ultimate material's strength S_{ut} , the true stress σ_t , and the true strain ϵ_t values (see Fig. 2) on which the proposed method is based, are as follows. Based on both F and A_0 , the S_{ut} value is defined as

$$S_{ut} = \frac{F}{A_0} \tag{1}$$

Therefore, based on the S_{ut} and ϵ values the true stress value defined as the instantaneous applied stress, at the S_{ut} coordinate, in terms of the S_{ut} and ϵ values are determined as

$$\sigma_t = S_{ut}(1 - \epsilon) \tag{2}$$

And the true strain value at the S_{ut} coordinate is given as

$$\epsilon_t = \ln(1 + \epsilon) \tag{3}$$

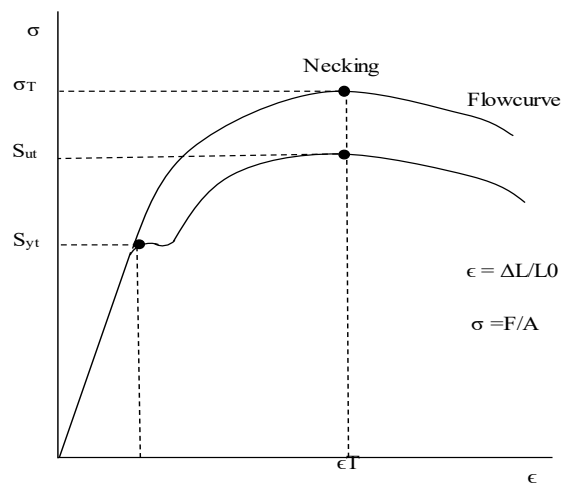


Figure 2. Stress-Strain representation. Source: The Authors

Thus, since now from Eq. (1) the S_{ut} value can be determined, and from Eq. (2), the corresponding σ_t value is given, then now let present how the b value is determined.

2.2 Fatigue Slope Formulation

In the analysis, the fatigue slope b value of the S-N curve is the exponent that let us to determine the strength range that corresponds to a desired pair of life cycles values [1]. The common approach in the S-N analysis consists in determining b in the logarithm range given by $N_1 = 10^3$ and $N_2 = 10^6$ cycles (see Fig.3). In this logarithm scale the cycles-strength coordinates to determine b are $[\log(10^3), \log(fS_{ut})]$ and $[\log(10^6), \log(S_e)]$. Where f represents the strength's percentage that the material presents after 10^3 cycles, and S_e represents the corresponding fatigue strength limit.

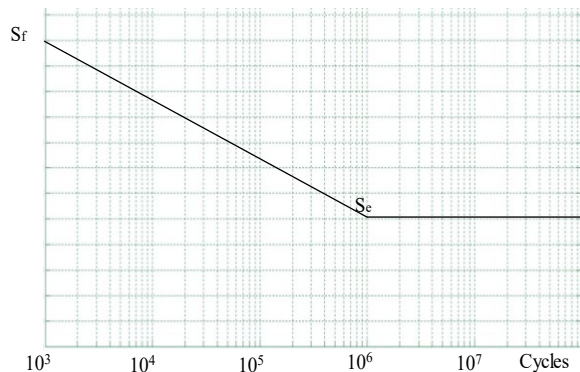


Figure 3. S-N curve representation. Source: The Authors

Hence, since in this logarithm range the S-N curve behavior is linear given as

$$Y_i = a + bX_i \text{ for } i=1,2 \tag{4}$$

Where $Y_1 = \log(fS_{ut})$, $Y_2 = \log(S_e)$, $X_1 = \log(10^3)$ and $X_2 = \log(10^6)$, then the fatigue b and parameters of the S-N curve are determined as

$$b = -\frac{1}{3} \log \left(\frac{fS_{ut}}{S_e} \right) \tag{5a}$$

$$a = \log \left(\frac{(fS_{ut})^2}{S_e} \right) \tag{5b}$$

Therefore, based on Eqs. (5a and 5b) the relation between the applied stress and its corresponding cycles to failure is given by the Basquin formula given as

$$N_i = \left(\frac{\sigma_{eq}}{a} \right)^{1/b} \tag{5c}$$

However, when S_e is unknown, then the fatigue b value defined in Eq.(5a), based on the σ_t value is given as

$$b = \frac{\log(fS_{ut}/\sigma_t)}{\log(2N)} \tag{6a}$$

Consequently, the cycles to failure defined in Eq.(5c) based on the σ_t value is given as

$$N_i = \frac{1}{2} \log \left(\frac{fS_{ut}}{\sigma_t} \right)^{1/b} \tag{6b}$$

Now that from Eq. (5a and 6a) we can determine the b value, let present the methodology to determine the strength Weibull β and $\eta(\sigma)$ parameters directly from the S_f and S_e values.

3. Weibull/Tensile Test/Reliability Methodology

This section is structured to present 1) the steps to determine the strength Weibull β and $\eta(\sigma)$ parameters directly from the maximum $S_f = (fS_{ut}) = S_{max}$ and the minimum $(S_e) = S_{min}$ tensile strength values. 2) how to use the derived β and $\eta(\sigma)$ parameters to determine the reliability percentile of the related S-N curve. And 3) how to determine the log-standard deviation σ_x value directly from the β value. Let start given the Weibull's generalities.

3.1 Generalities of the Weibull distribution

For the two parameter Weibull distribution [9] given by

$$f(t_i) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t_i}{\eta} \right)^{\beta-1} \exp \left\{ - \left(\frac{t_i}{\eta} \right)^\beta \right\} \tag{7}$$

Where t represents the desired life time, β is the shape parameter and η is the scale parameter. However, since in this paper the life of the element

is represented by either its cycles to failure N , or by its material's strength σ value, then by replacing t in Eq. (7) with either N_i or σ_i , the corresponding Weibull reliability function is given as

$$R(N_i \text{ or } \sigma_i) = \exp \left\{ - \left(\frac{N_i}{\eta_{(N)}} \right)^\beta \right\} = \exp \left\{ - \left(\frac{\sigma_i}{\eta_{(\sigma)}} \right)^\beta \right\} \quad (8)$$

From Eq. (8), notice that 1) although to determine the reliability of the element we can use either N_i or σ_i , the corresponding $\eta_{(N)}$ and $\eta_{(\sigma)}$ values are different ($\eta_{(N)} \neq \eta_{(\sigma)}$). And 2) the $\eta_{(N)}$ and $\eta_{(\sigma)}$ values are related by the life/stress model, as can be the Arrhenius, the inverse power law model and the Basquin equation defined here in Eq.(5c). Also notice that because in Weibull analysis, by supposing the failure mode remains constant, then in the analysis the β value is considered to be constant [10]. Consequently, as shown in Eq. (8), in any Weibull analysis, we always have two Weibull families. One representing the cycles to failure $W(\beta, \eta_{(N)})$, and the other representing the material strength $W(\beta, \eta_{(\sigma)})$. Here the analysis is performed based on the $W(\beta, \eta_{(\sigma)})$ family. Now let present the steps to determine the β and $\eta_{(\sigma)}$ parameters directly from the tensile $S_f = (fS_{ut}) = S_{max}$ and $(S_e) = S_{min}$ values.

3.2 Steps to Determine the Weibull Strength Parameters

Step1. From the used material determine the corresponding S_{ut} , σ_t and fatigue slope b values.

Step2. Determine the desired reliability $R(n)$ index to perform the analysis. In practice, it is $R(n)=0.9535$. And it corresponds to test a set of $n=21$ parts [11]. From [11], the relation between $R(n)$ and n is given as

$$R(n) = \exp \left\{ \frac{-1}{n} \right\} \quad (9)$$

Note 1. Here observe $R(n)$ is not the reliability of the element, instead $R(n)$ is just the reliability on

which the analysis will be performed. $R(n)$ is alike the confidence interval CL used in the quality field.

Step3. By using the n value of step 2 in Eq. (10), compute the Y_i elements [12] and its corresponding arithmetic mean μ_y and standard deviation σ_y values as

$$Y_i = \ln(-\ln(1 - (i - 0.3)/(n + 0.4))) \quad (10)$$

Note 2. Observe, once n was selected in step 2, the μ_y and σ_y values computed from the Y_i elements defined in Eq. (10) are both constant. For $n=21$ (or $R(n)=0.9535$) they are $\mu_y = -0.54562412$ and $\sigma_y = 1.17511694$. In this paper these two values are used.

Step 4. Based on Eq.(6b), by using $N_1 = 10^3$ and the σ_t and b values of step1, determine the maximum strength S_f value as

$$S_f = \sigma_t(2N_1)^b \quad (11)$$

Note 3. Observe that because $S_f = f * S_{ut}$, then from Eq. (11) the f value is directly given as $f = (S_f)/S_{ut}$.

Step 5. If the S_e value is unknown, then based on Eq.(6b), by using $N_2 = 10^6$ and the σ_t and b values of step1 determine the minimum strength S_e value as

$$S_e = \sigma_t(2N_2)^b \quad (12)$$

Step 6. By using the μ_y value from step 3, and the S_f and S_e values, determine the strength Weibull shape parameters as

$$\beta = \frac{-4*\mu_y}{0.99*\ln(S_f/S_e)} \quad (13)$$

Step 7. By using the addressed S_f and S_e values, determine the Weibull scale parameters as

$$\eta_{(\sigma)} = \sqrt[2]{S_f * S_e} \quad (14)$$

The β and $\eta_{(\sigma)}$ parameters determined in steps 6 and 7 are the parameters of the Weibull strength distribution.

Note 4. Notice if f , S_{ut} , and S_e are known then from Eq.(5a) b can be estimated, implying the true stress σ_t value is not necessary. It is to say, as shown in Eqs. (13 and 14), the Weibull strength parameters only depends on the S_f and S_e values.

Now based on the β and $\eta_{(\sigma)}$ parameters let determine the corresponding log-mean μ_x and log-standard σ_x deviation values used to formulate the confidence interval of μ_x .

3.3 Steps to Determine the Log-mean and the Log-standard Deviation

The analysis is based on the linear form of the reliability function [2] defined in Eq.(9) given as

$$Y_i = b_0 + \beta X_i \quad (15)$$

Thus, since from Eq. (15) $X_i = \ln(t_i)$, then we need to determine its log-mean μ_x and its log-standard deviation σ_x values. From [1] the μ_x value is directly given by the strength scale $\eta_{(\sigma)}$ parameters as

$$\mu_x = \ln(\eta_{(\sigma)}) \quad (16a)$$

And from [13], based on both the μ_y value of step 3, and on the addressed β value, the σ_x value is given as

$$\sigma_x = \frac{\sigma_y}{\beta} \quad (16b)$$

Thus, a confidence interval (CL) of μ_x is given as

$$CL = \mu_x \pm Z_{\alpha/2} \sigma_x \quad (17)$$

Where $Z_{\alpha/2}$ is the th desired percentile given by the normal distribution, (which for $CL=0.95$, is $Z_{0.1/2} = 1.644853$).

Unfortunately, although from Eq. (16a) $\mu_x = \ln(\eta_{(\sigma)})$, the CL limits defined in Eq. (17) cannot be used to determine a confidence interval for $\eta_{(\sigma)}$. Consequently, Eq. (17) cannot be used to determine the reliability percentiles of the S-N curve neither. This fact occurs because there is not a direct relationship between CL and $R(t)$. CL represents an instantaneous probability that the strength of n identical components behaves around μ_x , and $R(t)$ represents the probability that a observed (measured) μ_x value stay around this value through the time. It is to say, while the CL value depends only on the lack of homogeneity of the material, the $R(t)$ index depends also on the applied stress, the desired time t , and on the observed μ_x value. Thus, Eq. (17) should not be used to determine the S-N percentiles that represents the desired $R(t)$ index. Numerically, the deficiency of using CL in reliability analysis is given in section 4.2.

Here notice that in contrast to Eq. (17), in reliability analysis we are interested *only in the upper limit*. Consequently, since from Eq. (8) the $R(t)$ index depends only on the $\eta_{(\sigma)}$ value, then because $\mu_x = \ln(\eta_{(\sigma)})$, in the analysis μ_x is the lower allowed value that we can used to design the element. Therefore, as shown in [14] if $\mu_x = \ln(\eta_{(\sigma)})$ is going to be monitored in a process, then in the monitoring control chart the μ_x value must be set us the lower allowed value.

Now based on the addressed μ_x and σ_x values, let present the formulation to determine the reliability percentile of the related S-N curve.

3.4 Reliability Percentiles for the S-N Curve

The efficiency of the proposed method is based on the following two facts.

1) Since from Eq.(14), $\eta_{(\sigma)}$ is given as the square root of the product of S_f , and S_e , then in logarithm scale $\mu_x = \ln(\eta_{(\sigma)})$ is the average between S_f and

S_e , implying that $\ln(S_f) - \ln(\eta_\sigma) = \ln(\eta_\sigma) - \ln(S_e)$ or equivalently that the relation given in Eq.(18) always holds

$$\ln(S_f/\eta_\sigma) = \ln(\eta_\sigma/S_e) \tag{18}$$

2) Because in logarithm scale the three values, $\ln(S_f)$, $\ln(\eta_\sigma)$ and $\ln(S_e)$, all are in the same S-N line, then this line represents the lower th-reliability percentile for which it is expected the product present the desired $R(t)$ index. Consequently, from Eq. (18) and Eq. (8), we have that the following reliability relationship always holds

$$R(\sigma) = \exp\left\{-\left(\frac{\eta(\sigma)}{\eta_{\sigma Ni}}\right)^\beta\right\} = \exp\left\{-\left(\frac{S_{fi}}{S_f}\right)^\beta\right\} = \exp\left\{-\left(\frac{S_{ei}}{S_e}\right)^\beta\right\} \tag{19}$$

Eq. (19) implies that in practice, *the derived reliability percentiles of the S-N curve can also be used as the minimum strength $\eta_{(\sigma i)}$ value that the used material must present to have the desired reliability.* Now based on the above two facts, the steps to determine the reliability percentiles of the S-N curve are as follows.

3.4.1 Steps to Determine the Reliability Percentiles for the S-N Curve

Step 1. Determine the Y_i element that corresponds to the desired upper reliability percentile of the S-N curve as

$$Y_{ui} = \ln(-(\ln(R(t_{ui})))) \tag{20a}$$

Step 2. Determine the Y_i element that corresponds to the desired lower reliability percentile of the S-N curve as

$$Y_{Li} = \ln(-(\ln(1 - R(t_{Li})))) \tag{20b}$$

Step 3. By using the Y_{ui} value of step1, determine the upper values of S_f , η_σ , and S_e that corresponds

to the upper reliability percentile of the S-N curve as

$$S_{fu} = \frac{S_f}{\text{Exp}\{Y_{ui}/\beta\}}; \eta_{(\sigma u)} = \frac{\eta_\sigma}{\text{Exp}\{Y_{ui}/\beta\}}; S_{eu} = \frac{S_e}{\text{Exp}\{Y_{ui}/\beta\}} \tag{21}$$

Step 4. By using the Y_{Li} value of step 2, determine the lower value of S_f , $\eta(\sigma)$, and S_e that corresponds to the lower reliability percentile of the S-N curve as

$$S_{fL} = \frac{S_f}{\text{Exp}\{Y_{Li}/\beta\}}; \eta_{(\sigma L)} = \frac{\eta(\sigma)}{\text{Exp}\{Y_{Li}/\beta\}}; S_{eL} = \frac{S_e}{\text{Exp}\{Y_{Li}/\beta\}} \tag{22}$$

Step 5. Plot the upper and lower reliability percentiles.

Now let present the numerical application.

4. Numerical Application

As an application let used data given in the first row of Table A-23 of the Shigly's book. The material is the steel grade (a) A538A (b). For this material, the Weibull strength parameters of section 3.2 are as follows.

4.1 Weibull Strength Parameters

Step 1. The corresponding strength data are $S_{ut} = 1515\text{MPa}$, $\sigma_t = 1655\text{MPa}$ and fatigue slope $b = 0.065$.

Step 2. Suppose $R(n) = 0.9535$ is desired.

Step 3. The Y_i elements are given in Table 1. From these data $\mu_y = -0.54562412$ and $\sigma_y = 1.17511694$.

Step 4. The maximum strength is $S_f = 1655(2 * 1000)^{-0.065} = 1009.79\text{MPa}$.

Step 5. The minimum strength is $S_e = 1655(2 * 1000,000)^{-0.065} = 644.51\text{MPa}$.

Step 6. The Weibull shape parameter is $\beta = \frac{-4*(-0.54562412)}{0.99*\ln(1009.79/644.51)} = 4.909848$.

Step 7. The Weibull scale parameter is $\eta_{(\sigma)} = \sqrt[2]{1009.79 * 644.51} = 806.7353\text{MPa}$.

Therefore the Weibull strength distribution to the steel grade (a) A538A (b) material is $W(4.909848, 806.7353MPa)$.

Now based on these parameters let determine the corresponding log-mean μ_x and log-standard deviation σ_x values mentioned in section 3.3.

Table 1. Elements of vector Y by using Eq.(10)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Y_i	-3.403483	-2.491662	-2.003463	-1.6616459	-1.3943983	-1.1720537	-0.9793812	-0.807447	-0.6504921	-0.50450882	-0.366512921
n	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	$\mu_y = -0.54562412$
Y_i	-0.234122	-0.105285	0.0219284	0.1495258	0.279845	0.4159621	0.56250196	0.7276158	0.92931067	1.22965981	$\sigma_y = 1.17511694$

Source: The Authors

4.2 Log-mean and Log-standard Deviation

From Eq. (16a), the log-mean is $\mu_x = \ln(806.7353) = 6.692995$ and from Eq.(16b) the log-standard deviation is $\sigma_x = \frac{1.17511694}{4.909848} = 0.239338$, (observe both μ_x and σ_x were determined without any observed failure time data). Therefore, from Eq.(17), the 95% confidence interval for μ_x is $CL = 6.692995 \pm 1.644853 * 0.239338$; $[6.299319 \leq \mu_x \leq 7.086673]$ or equivalently because from Eq.(16a) $\mu_x = \ln(\eta_{(\sigma)})$, then by taking the exponential, the 95% confidence interval for η_{σ} is $[544.2009MPa \leq \eta_{(\sigma)} \leq 1195.9219MPa]$, unfortunately as shown next, this confidence interval should not be used in reliability analysis. For example, notice that although under probabilistic point of view we can say with a confidence level of 95% the lower expected value of the Weibull scale parameter is $\eta_{(\sigma L)} = 544.2009MPa$, and then it should be monitored in the production process in logarithm scale as in Fig.4 and/or in natural scale as in Fig.5

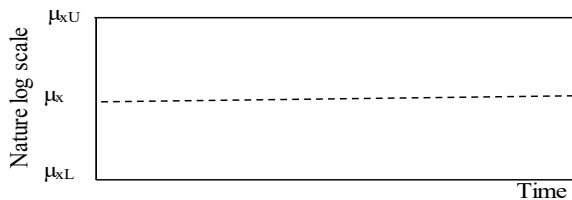


Figure 4. Control Chart for μ_x (logarithm Scale). Source: The Authors

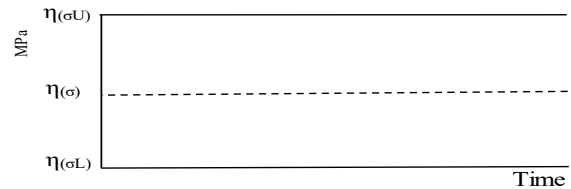


Figure 5. Control Chart for the Weibull scale parameter. Source: The Authors

Unfortunately, as mentioned above in reliability, monitoring (or using) the lower limit of $\eta_{(\sigma)}$ is *not correct* because in reliability the addressed $\eta_{(\sigma)}$ value (or nominal μ_x value) is the lower allowed value. Thus, in the monitoring process, the $\eta_{(\sigma)}$ value (or equivalently the μ_x value) is the one that must be set as the lower allowed limit in the control chart (see Fig.6 and Fig.7).



Figure 6. Control Chart for μ_x (logarithm Scale). Source: The Authors



Figure 7. Control Chart for the Weibull scale parameter. Source: The Authors

Additionally, it is shown that although by using the *CL* limits defined in Eq. (17), the 95% confidence for the S-N curve plotted in Fig.8 is possible, they do not the 95% reliability confidence interval for the S-N curve. Consequently, because the *CL* confidence interval is not a reliability percentile, then by using the *CL* values in Eq. (19), the estimated reliability is not the desired $R(t)=0.95$ index.

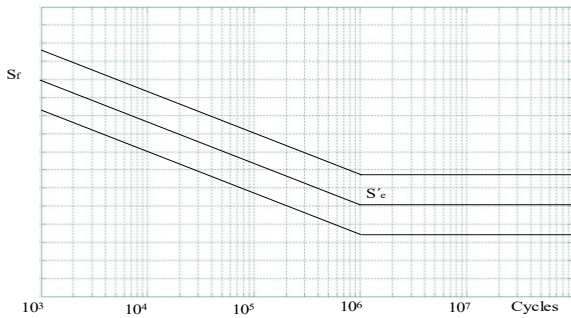


Figure 8. Probabilistic Percentiles for the S-N curve. Source: The Authors

Seeing this observe that by using the upper and lower limits of *CL* to determine $R(\sigma)$, the demonstrated reliability is not the desired one. For the upper level $\eta(\sigma_U) = 1195.9219MPa$, then with $\eta(\sigma) = 806.7356MPa$ in Eq.(19), the estimated reliability instead of be $R(\sigma) = 0.95$ is only $R(\sigma_U) = \exp\left\{-\left(\frac{806.7356}{1195.9219}\right)^{4.909848}\right\} = 0.8653$.

Similarly, if we use the lower confidence level $\eta(\sigma_U) = 544.2009MPa$ with $\eta(\sigma) = 806.7356MPa$ in Eq.(19), the estimated reliability index instead of be $R(\sigma) = 0.95$, also is only of $R(\sigma_L) = \exp\left\{-\left(\frac{544.2009}{806.7356}\right)^{4.909848}\right\} = 0.8653$.

Therefore, the general conclusion is that by using the *CL* limits in reliability analysis we sub-estimate the real $R(\sigma)$ index ($0.8653 < 0.95$) of the

element, and consequently the *CL* limits should not be used in the reliability analysis.

Now we know the *CL* values should not be used, let determine the reliability percentiles for the S-N curve that we can use in any reliability analysis. Following section 3.4.1, the analysis is as follows.

4.3 Reliability Percentiles for the S-N Curve

The reliability percentile analysis for the S-N curve is as follows

Step 1. From Eq.(20a) the upper Y_i element for $R(t)=0.95$ is $Y_{ui} = \ln(-(\ln(0.95))) = -2.970195249$.

Step 2. From Eq.(20b) the lower Y_i element for $R(t)=0.05$ is $Y_{Li} = \ln(-(\ln(1 - 0.95))) = 1.0971887$.

Step 3. From Eq. (21) the upper strength values are

$$S_{fu} = \frac{1009.79MPa}{\text{Exp}\{-2.970195249/4.909848\}} = 1849.08MPa.$$

$$\eta(\sigma_U) = \frac{806.7353MPa}{\text{Exp}\{-2.970195249/4.909848\}} = 1477.26MPa$$

and $S_{eu} = \frac{644.51MPa}{\text{Exp}\{-2.970195249/4.909848\}} = 1180.20MPa.$

Step 4. From Eq. (22) the lower strength values are

$$S_{fL} = \frac{1009.79MPa}{\text{Exp}\{1.0971887/4.909848\}} = 807.57MPa,$$

$$\eta(\sigma_L) = \frac{806.7353MPa}{\text{Exp}\{1.0971887/4.909848\}} = 645.18MPa \text{ and}$$

$$S_{eL} = \frac{644.51MPa}{\text{Exp}\{1.0971887/4.909848\}} = 515.44MPa.$$

From the above data, notice because the Y_{ui} value was determined by using $R(\sigma) = 0.95$, then by using the S_{fu} , $\eta(\sigma_u)$ and S_{eu} values in Eq. (19), the reliability percentile is always $R(\sigma) = 0.95$.

$$\begin{aligned} \text{For } R(\sigma/S_f, S_{fu}) &= \exp\left\{-\left(\frac{1009.79}{1849.08}\right)^{4.909848}\right\} = 0.95, \\ R(\sigma/\eta(\sigma), \eta(\sigma_u)) &= \exp\left\{-\left(\frac{806.7356}{1477.26}\right)^{4.909848}\right\} = 0.95, \text{ and } R(\sigma/S_e, S_{eu}) = \exp\left\{-\left(\frac{644.51}{1180.20}\right)^{4.909848}\right\} = 0.95. \end{aligned}$$

Similarly, since the Y_{Li} value was determined by using $R(\sigma) = 0.05$, then by using the S_{fL} , $\eta(\sigma_L)$

and S_{eL} values in Eq. (19), the reliability percentile in all cases is always $R(\sigma) = 0.05$.

$$\begin{aligned} \text{For } R(\sigma/S_f, S_{fL}) &= \exp\left\{-\left(\frac{1009.79}{807.57}\right)^{4.909848}\right\} = 0.05, \\ R(\sigma/\eta(\sigma), \eta(\sigma_L)) &= \exp\left\{-\left(\frac{806.7356}{645.18}\right)^{4.909848}\right\} = 0.05 \text{ and } R(\sigma/S_e, S_{eL}) = \exp\left\{-\left(\frac{644.51}{515.44}\right)^{4.909848}\right\} = 0.05. \end{aligned}$$

The corresponding percentiles of the S-N curve in MPa and in logarithm scale are all given in Table 2.

Table 2. Reliability Percentiles for the S-N curve of the A538A (b) steel

Limits	Percentiles in Mpa Values			Percentiles in logarithm scale		
	Sf	$\eta(\sigma)$	Se	ln(Sf)	ln($\eta(\sigma)$)	ln(Se)
Upper	1849.08	1477.26	1180.20	7.5224	7.2979	7.0734
Mean	1009.79	806.74	644.51	6.9175	6.6930	6.4685
Lower	807.57	645.18	515.44	6.6940	6.4695	6.2450

Source: The Authors

Here it is very important to notice from either Table 2 or Figure 9 that data in MPa do not fall in a right line with the $\eta_{(\sigma)}$ value.

In contrast observe from Fig. 10 that in logarithm scale they are in line with the $\eta_{(\sigma)}$ value. Also notice from Fig.9 and Fig.10 that the upper and lower percentiles are not symmetric around the $\eta_{(\sigma)}$ value, and that this fact is due to in Weibull analysis, the $\eta_{(\sigma)}$ does not represent the 0.50 percentile, instead it represents the 0.6321 failure percentile, implying the limits around the $\eta_{(\sigma)}$ value never will be symmetric around the $\eta_{(\sigma)}$ value.

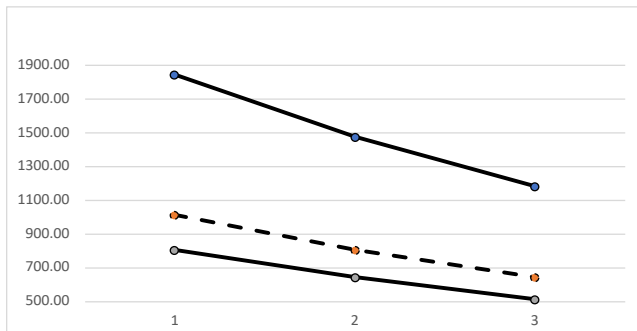


Figure 9. S-N curve in MPa values. Source: The Authors

Additionally, remember that as shown in Eq. (18), the symmetrical behavior around $\eta_{(\sigma)}$ occurs only for the S_f and S_e values from which the $\eta_{(\sigma)}$ value was determined. In order to clarify the mentioned facts, in Table 3 the Weibull analysis for the expected values of $\eta_{(\sigma)}$ are given.

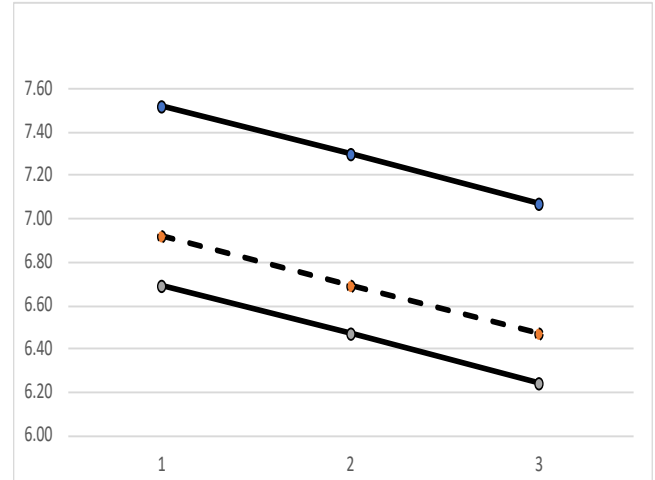


Figure 9. S-N curve in logarithm scale. Source: The Authors

Table 3. Weibull Scale Analysis

<i>n</i>	<i>Y_i</i>	<i>Y_{ui}</i>	σ_i	$\eta(\sigma_i)$	<i>R(t)</i>
1	-3.4035	0.5000	403.35	1613.55	0.9673
	-2.9702	0.5461	440.56	1477.26	0.9500
2	-2.4917	0.6020	485.66	1340.07	0.9206
3	-2.0035	0.6649	536.44	1213.23	0.8738
4	-1.6616	0.7129	575.11	1131.64	0.8271
5	-1.3944	0.7528	607.28	1071.69	0.7804
6	-1.1721	0.7876	635.42	1024.24	0.7336
	-1.1023	0.7989	644.51	1009.79	0.7174
7	-0.9794	0.8192	660.85	984.83	0.6869
8	-0.8074	0.8484	684.40	950.94	0.6402
9	-0.6505	0.8759	706.63	921.02	0.5935
10	-0.5045	0.9023	727.96	894.04	0.5467
11	-0.3665	0.9281	748.71	869.26	0.5000
12	-0.2341	0.9534	769.17	846.14	0.4533
13	-0.1053	0.9788	789.62	824.22	0.4065
	0.0000	1.0000	806.735	806.735	0.3679
14	0.0219	1.0045	810.35	803.14	0.3598
15	0.1495	1.0309	831.68	782.54	0.3131
16	0.2798	1.0587	854.05	762.04	0.2664
17	0.4160	1.0884	878.06	741.20	0.2196
18	0.5625	1.1214	904.66	719.41	0.1729
19	0.7276	1.1597	935.60	695.62	0.1262
20	0.9293	1.2084	974.84	667.62	0.0794
	1.0972	1.2504	1008.74	645.18	0.0500
	1.1023	1.2517	1009.79	644.51	0.0492
21	1.2297	1.2846	1036.33	628.00	0.0327

Source: The Authors

The practical interpretation of data given in Table 3 is as follows.

1. The values of the column σ_i in Table 3 represent the maximum applied stress values for which a product that has the $\eta_{(\sigma)}$ strength value, will present the reliability $R(t)$ index given in the row of Table 3 that corresponds to the selected σ_i value. For example, if a component (material) with strength of $\eta_{(\sigma)} = 806.7353MPa$, is subjected to constant stress of $\sigma = 403.35MPa$, then as shown in Table 3, it is expected the element will present a minimum reliability of $\exp\left\{-\left(\frac{403.35}{806.7353}\right)^{4.909848}\right\} = 0.9673$. In Table 3, by using the Y_i value defined in Eq. (10), the corresponding σ_i value was determined as

$$\sigma_i = \eta_{(\sigma)} * \exp\{Y_i/\beta\} \quad (23)$$

2. The values of the column $\eta_{(\sigma_i)}$ in Table 3, represent the strength value that a product should have to present the given reliability $R(t)$ index when the applied stress is constant at the $\eta_{(\sigma)}$ value. For example, the $\eta_{(\sigma_i)} = 1613.55MPa$ value given in the first row of Table 3, represents the minimum strength value that a product (material) must have to presents a reliability of $R(t) = 0.9673$ when the maximum applied stress is constant at the value of $\eta_{(\sigma)} = 806.7353MPa$. It is to say $R(t) = \exp\left\{-\left(\frac{806.7353}{1613.55}\right)^{4.909848}\right\} = 0.9673$. In Table 3, the $\eta_{(\sigma_i)}$ value was determined as

$$\eta_{(\sigma_i)} = \eta_{(\sigma)}/\exp\{Y_i/\beta\} \quad (24)$$

From Table 3 also notice the rows where the Weibull analysis reproduce the $S_f = 1009.79MPa$ and $S_e = 644.51MPa$ values, as well as the upper 95% and lower 5% percentiles of $\eta_{(\sigma)}$ were also added. Also from Table 3,

notice that as shown in Fig. 9 and in Fig. 10 the behavior around the $\eta_{(\sigma)}$ value is not symmetrical. Now let determine the reliability of a component by using the stress/strength analysis.

5. Stress/Strength Analysis

Since all mechanical element is subjected to an applied stress and it has an inherent strength to overcome the applied stress, then because both the stress and the strength are random variable, the element's reliability must be determined based on the distribution that represent the applied stress, and on the distribution that represent the inherent strength. Therefore, the right reliability function to be used in the analysis of a mechanical element is the composed reliability function known as a stress/strength reliability function [15]. In this stress/strength approach any pair of combination of stress and strength functions is possible. However, the most common combinations are the normal/normal, the log-normal/log-normal, the Weibull/Weibull and any pair of combination among these three distributions [16]. But because here the analysis is a stress-based analysis which is efficiently modeled by the Weibull distribution, then the Weibull/Weibull approach is used as follows.

5.1 Numerical Analysis

In this section, the strength Weibull distribution data addressed in section 4.1 of the steel grade (a) A538A (b) material is used. From this section the addressed Weibull strength family is W ($\beta=4.909848$, $\eta_{(\sigma)}=806.7353MPa$). Therefore, to apply the stress/strength analysis the corresponding stress Weibull distribution must be addressed. Doing this, suppose from an application the maximum principal applied stress is $\sigma_1 = 600MPa$ and the minimum principal applied stress that generates a failure is $\sigma_2 =$

380MPa. (σ_1 and σ_2 are the principal stresses given by the Mohr circle analysis). Thus, with these two principal stress values, from Eq. (14) the scale Weibull stress parameter is $\eta_s = \sqrt[2]{600 * 380} = 447.4935MPa$, and from Eq. (13) $\beta=4.909848$. Thus, the Weibull stress distribution is $W_s(\beta=4.909848, \eta_s=477.4935MPa)$. Consequently, from the Weibull/Weibull stress/strength reliability function [1] given as

$$R(t/\eta_s, \eta_{(\sigma i)}) = \frac{\eta_{(\sigma i)}^\beta}{\eta_{(\sigma i)}^\beta + \eta_s^\beta} \quad (25)$$

Therefore, the reliability of the designed component is

$$R(t, \eta_s, \eta_{(\sigma i)}) = \frac{806.7353^{4.909848}}{806.7353^{4.909848} + 477.4935^{4.909848}} = 0.9292.$$

Finally, it is important to observe because the reliability index given in Table 3 and that given from Eq. (25) tends to be the same for high reliability indices, (say a reliability above 0.90), then the reliability of an element can be determined directly by using the Weibull strength parameters as in Table 3, or by using the stress and strength distributions in Eq. (25).

Seeing this numerically, suppose that in an application the used material is subjected to reversible stress with Weibull stress parameter $\eta_s=403.35MPa$. Therefore, from Eq. (25), **as shown in Table 3**, the estimated reliability is

$$R(t, \eta_s, \eta_{(\sigma i)}) = \frac{806.7353^{4.909848}}{806.7353^{4.909848} + 403.35^{4.909848}}$$

Similarly, if the applied stress is $\eta_s=536.44MPa$, then

$$it is R(t, \eta_s, \eta_{(\sigma i)}) = \frac{806.7353^{4.909848}}{806.7353^{4.909848} + 536.44^{4.909848}} = 0.8811. For detail of the given formulation see [1].$$

Consequently, for high reliability indices, the σ_i column of any **Weibull Strength** analysis can be used as the maximum allowed constant stress value that we can apply, in order the component presents the desired reliability. Similarly, the $\eta_{(\sigma i)}$ column of any **Weibull Strength** analysis can be used as the minimum allowed strength value that the used material must present, in order the designed element present the desired reliability when it is subjected to a maximum stress value represented by the strength scale $\eta_{(\sigma)}$ value. Now by using the proposed Weibull/S-N methodology, the Weibull parameters, the log-mean and log-standard deviation parameters and the 0.95 and 0.05 reliability percentiles of each one of the steel materials given in Table A-23 of the Shigly's book are all given in Table 4.

6. Weibull/S-N analysis for Materials given in Table A-23 of the Shigly's book.

The analysis is presented in Table 4.

7. Conclusions

1. Although the relation $\mu_x = \ln(\eta_{(\sigma)})$ holds, the confidence interval CL limits of a S-N curve defined in Eq. (17), should not be used to perform a reliability analysis. They sub-estimate the reliability index.

2. From Eqs. (21 and 22) the upper and lower S_f , $\eta_{(\sigma)}$, and S_e values to determine any desired reliability percentile for a S-N curve are given by using only the corresponding $Y_{L,ui}$ and β values.

3. Observe that although here the Weibull strength parameters were both determined for $N_1 = 10^3$ and $N_2 = 10^6$, any other desired values between these two values can be used.

4. As shown in Table 3, the lower reliability percentiles of the S-N curve are the minimum strength values given in the column $\eta_{(\sigma i)}$ of Table

5. Due to the column $\eta_{(\sigma i)}$ of Table 3 represents the minimum strength values that the designed element must have to present the desired reliability, then the reliability percentiles of the S-N curve can be used as the accelerated levels in and ALT test to demonstrate the product presents the intended reliability [17].

6. Although the Weibull analysis performed in Table 3 is for constant stress values, and that given by the stress/strength methodology is for variable stress behavior, for high reliability indexes, the estimated reliability indexes are both similar [18] [$R(\sigma) \cong R(t, \eta_s, \eta_{(\sigma i)})$]. Formal formulation why this fact occurs is an open issue on which more research must be undertaken.

8. Authorship acknowledgements

Manuel Baro Tijerina: Conceptualización; Ideas; Metodología; Análisis formal; Investigación; Borrador original. *Manuel R. Piña Monarrez*: Conceptualización; Ideas; Escritura. *Alberto Jesús Barraza Contreras*: Análisis de datos; Escritura; Borrador original; Revisión y edición.

References

- [1] M.R. Piña-Monarrez, “Weibull Stress Distribution for Static Mechanical Stress and its Stress/strength Analysis” *Qual Reliab Engng Int.* vol. 34, pp. 229–244. 2018. <https://doi.org/10.1002/qre.18-0532>.
- [2] R. Budynas, and J. Nisbett, “Shigley’s Mechanical Engineering Design (Tenth edition)”. New York: McGraw Hill 2015. ISBN: 13-978-0-07-339820-4.
- [3] J. Gao, Z. An, and B. Liu, “A new method for obtaining P-S-N curves under the condition of small sample”. *Proc IMechE, Part O: J Risk and Reliability* vol. 231, no. 2, pp. 130-137. 2017. <https://doi.org/10.1177/1748006X16686896>.
- [4] K.B. Rao, M.B. Anoop, G. Rahava, M. Prakash, and A. Rajadurai, “Probabilistic fatigue life analysis of welded steel plate railway bridge girders using S-N curve approach”. *Proc IMechE, Part O: J Risk and Reliability* vol. 227, no. 4, pp. 385-404. 2013. <https://doi.org/10.1177/1748006X13480754>.
- [5] D.B. Kececioglu, “Robust Engineering Design-By-Reliability with Emphasis on Mechanical Components and Structural Reliability”. Pennsylvania: DEStech Publications Inc. 2003. ISBN:1-932078-07-X.
- [6] S.R. Schmid, B.J. Hanrock, and B.O. Jacobson, “Fundamentals of Machine Elements SI Version”, Third Edition. CRC Press, Taylor and Francis Group Boca Raton FL 33487-2742. U.S. A. 2014. ISBN:13:978-1-4822-4750-3.
- [7] E. S. Lindquist, “Strength of materials and the Weibull distribution”. *Prob. Eng. Mech.* Vol. 9, no. 3,

pp. 191-194. 1994. [https://doi.org/10.1016/0266-8920\(94\)90004-3](https://doi.org/10.1016/0266-8920(94)90004-3)

[8] H. Rinne, “The Weibull distribution a handbook”, CRC press, Boca Ratón, FL, USA, 2009. ISBN: 13-978-1-4200-8743-7.

[9] W. Weibull, “A statistical theory of the strength of materials”. Proceedings, R Swedish Inst Eng Res vol. 151, no. 45, 1939.

[10] R. Jiang, “A novel parameter estimation method for the Weibull distribution on heavily censored data”. Proc IMechE, Part O: J Risk and Reliability pp. vol. 236, no. 2, pp. 1-10. 2019. <https://doi.org/10.1177/1748006X19887648>.

[11] M.R. Piña-Monarez, Weibull Analysis for Normal/Accelerated and Fatigue Random Vibration Test. Qual Reliab Engng Int. vol. 35, no. 7, pp. 2408-2428. 2019. <https://doi.org/10.1002/qre.2532>.

[12] C.R. Mischke, “A distribution-independent plotting rule for ordered failures”. J. Mech. Des. Vol. 104, pp. 593-597. 1979. <https://doi.org/10.1115/1.3256391>.

[13] M.R. Piña-Monarez, J.F. Ortiz-Yañez, “Weibull and Lognormal Taguchi Analysis Using Multiple Linear Regression”. Reliab Eng Syst Saf. Vol. 144, pp. 244-53. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.res.2015.08.004>.

[14] M.R. Piña-Monarez, “Conditional Weibull control charts using multiple linear regression”. Qual Reliab Eng Int vol. 33, no. 4, pp. 785-791. 2016. <https://doi.org/10.1002/qre.2056>.

[15] E.E. Franz Boehm, and E.E. Lewis. “A stress-strength interference approach to reliability analysis of ceramics: Part I — fast fracture Probabilistic Engineering Mechanics”, vol. 7, no. 1, pp. 1-8. 1992. [https://doi.org/10.1016/0266-8920\(92\)90002-Y](https://doi.org/10.1016/0266-8920(92)90002-Y).

[16] R.L.M. Sales Filho, E. López Droguett, ID. Lins, M.C. Moura, M. Amiri, R.V. Azevedo, “Stress-strength reliability analysis with extreme values based on q-exponential distribution”. Qual Reliab Engng Int. vol. 33, no. 3, pp. 457-477. 2017. <https://doi.org/10.1002/qre.2020>.

[17] Z.A. Al-Hemyari, “Some estimators for the scale parameter and reliability function of Weibull lifetime data”. Proc IMechE, Part O: J Risk and Reliability. Vol. 224, pp. 197-205. 2010. <https://doi.org/10.1243/1748006XJRR299>.

[18] A. Kleyner, “Effect of field stress variance n test to field correlation in accelerated reliability demonstration testing”. Qual Reliab Engng Int. vol. 31, no. 5, pp. 783-788. 2015. <https://doi.org/10.1002/qre.1635>.

Derechos de Autor (c) 2022 Manuel Baro Tijerina, Manuel R. Piña Monarez, Jesús Barraza Contreras



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Usted es libre para compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen del licencia](#) - [Texto completo de la licencia](#)



Evaluación de toxicidad de nanogeles termosensibles en modelo *in vivo*

Toxicity evaluation of thermosensitive nanogels in an in vivo model

Alondra Montañez-Ríos¹, Aracely Serrano-Medina², Juan M. Irache³, Ana Luisa Martínez-López³, Ignacio Rivero⁴, José Manuel Cornejo-Bravo^{1*}

¹Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, Calzada Universidad 14418, Parque industrial Internacional, Tijuana, Baja California, México, C.P. 22427.

²Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Medicina y Psicología, Calzada Universidad 14418, Parque industrial Internacional, Tijuana, Baja California, México, C.P. 22427.

³NANO-VAC Research Group, Department of Chemistry and Pharmaceutical Technology, University of Navarra, Pamplona 31080, Spain.

⁴Tecnológico Nacional de México/I. T. Tijuana. Centro de Graduados e Investigación en Química, Blvd. Alberto Limón Padilla S/N, 22510 Tijuana, Baja California, México.

Autor de correspondencia: José Manuel Cornejo Bravo, Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, Calzada Universidad 14418, Parque industrial Internacional, Tijuana, Baja California, México, C.P. 22427. E-mail: jmcornejo@uabc.edu.mx. ORCID 0000-0002-0013-8937.

Recibido: 6 de Septiembre del 2022

Aceptado: 27 de Septiembre del 2022

Publicado: 30 de Septiembre del 2022

Resumen. – Este estudio utiliza *C. elegans* para evaluar la toxicidad de los nanogeles (NG) copoliméricos de *N*-isopropilacrilamida (NIPAAm) y metacrilato de 2-(dietilamino)etilo (DEAEM), preparados mediante polimerización en emulsión sin tensoactivo utilizando polietilenglicol monometil éter metacrilato (PEGMA) como estabilizador reactivo. Los nematodos ingirieron NG marcados con fluoresceína, como se demostró mediante microscopía de fluorescencia. Se utilizaron dos iniciadores diferentes, catiónicos y aniónicos para iniciar la síntesis de los NG. Los resultados demuestran que ambos tipos de NG afectan el tamaño y la reproductividad de los nematodos. *C. elegans* es un modelo pluricelular potencial para evaluar la toxicidad de los NG sensibles, evitando el uso de mamíferos para las evaluaciones.

Palabras clave: Nanogeles; *C. elegans*; NIPAAm; Toxicidad.

Abstract. – This study uses *C. elegans* to assess the toxicity of copolymeric nanogels (NG) of *N*-isopropylacrylamide (NIPAAm) and 2-(diethylamino)ethyl methacrylate (DEAEM), prepared by surfactant-free emulsion polymerization using polyethylene glycol monomethyl ether methacrylate (PEGMA) as a reactive stabilizer. Nematodes ingested fluorescein-labeled NG, as demonstrated by fluorescence microscopy. Two different initiators, cationic and anionic, were used to initiate the synthesis of the NG. The results indicate that both types of NG affect the size and reproducibility of nematodes. *C. elegans* is a potential multicellular model to evaluate the toxicity of sensitive NG, avoiding the use of mammals for evaluations.

Keywords: Nanogels; *C. elegans*; NIPAAm; Toxicity.

1. Introducción

Los nanogeles térmicamente sensibles (NG) exhiben un cambio en su transición de hinchamiento y contracción a una temperatura de transición crítica baja (LCST) [1]. Una alternativa de gran utilidad es poli(N-isopropilacrilamida) (PNIPAAm) es el polímero termosensible más ampliamente estudiado con una LCST de 32 °C [2], [3]. Esta temperatura es cercana a la temperatura corporal por lo que los nanogeles y microgeles de NIPAAm tienen un gran potencial en aplicaciones biomédicas como liberación controlada de fármacos [4], [5], y portadores de genes [6], [7], así como materiales de terapia dirigida a patologías donde se genera un cambio en la temperatura [8]–[12] y materiales embólicos de vasos sanguíneos [13].

Una preocupación con el monómero y los polímeros de NIPAAm es su toxicidad. Se han realizado varios estudios para evaluar la toxicidad de NIPAAm y sus productos poliméricos en cultivos celulares [14]. Por ejemplo, Wadajkar *et. al* demostraron que los monómeros de NIPAAm son citotóxicos, mientras que las nanopartículas de PNIPAAm son compatibles a una concentración de 5 mg/mL o inferior para fibroblastos, células de músculo liso y células endoteliales, incluso cuando queda una pequeña cantidad del monómero en el material [15]. En cuanto a los estudios de toxicidad en animales, Malonne *et al.* estudiaron la toxicidad después de la administración oral de copolímeros de PNIPAAm a ratones; no encontraron toxicidad a 400 mg/kg de peso corporal [16]. En otro estudio, se evaluó el efecto de inyecciones intravítreas de PNIPAAm como adhesivo tisular en conejo. Los investigadores encontraron que PNIPAAm no era tóxico en este estudio [17].

La capacidad de administrar fármacos y material genético en las células depende de la carga superficial del nanomaterial. Se ha establecido que las nanopartículas catiónicas tienen la capacidad de penetrar en las células, presentando una mayor eficacia para la obtención de imágenes, la transferencia de genes y la administración de fármacos [18].

Las nanopartículas tienen la condición de mejorar la estabilidad y la solubilidad de las cargas encapsuladas, fomentando el transporte a través de membranas y prolongando los tiempos de circulación para aumentar la seguridad y la eficacia [19], [20].

Sin embargo, las nanopartículas con carga positiva presentan mayor citotoxicidad que las nanopartículas con carga negativa [21].

Como se observó anteriormente, la mayoría de las evaluaciones de toxicidad se realizan en cultivos celulares. Surgen preocupaciones sobre el número limitado de líneas celulares estudiadas en las evaluaciones de toxicidad considerando las diferencias en los mecanismos de absorción del material, la sensibilidad celular, etc. Es, por lo tanto, necesario utilizar un modelo pluricelular para una mejor predicción de la toxicidad de los nanomateriales en humanos.

Las diferencias entre especies no son el único factor que limita la traducción clínica, también la diversidad entre pacientes puede limitar el éxito de los nanomedicamentos [22].

Muchas de las primeras iteraciones de NP no pudieron superar estas barreras biológicas para la entrega, pero los diseños de NP más recientes han utilizado avances en estrategias de síntesis controlada para incorporar estructuras complejas,

fracciones biosensibles y agentes para mejorar la entrega [23], [24].

Caenorhabditis elegans (*C. elegans*) es un nematodo de vida libre de 1 mm de largo que fue postulado como modelo animal en 1965 por Sydney Brenner [25]. Existe una superposición sustancial entre *C. elegans* y los seres humanos con respecto a los genes y las vías bioquímicas [26]. Los análisis bioinformáticos sugieren que entre el 38% y el 40% de los genes del gusano son homólogos a los humanos [27]. En entornos de laboratorio, *C. elegans* ingiere *Escherichia coli* OP50 de la dieta bombeándolos a la boca y concentrándolos en la faringe antes de pasar al intestino [28], [29]. *C. elegans* es un organismo muy simple. Consta de cinco parejas de cromosomas autosómicos y una pareja de cromosomas sexuales, siendo su tamaño de 100 millones de pares de bases de nucleótidos; veinte veces mayor que el genoma de *E. coli* y sobre 1/30 parte del genoma humano [30], [31]. El hermafrodita adulto tiene exactamente 959 células somáticas [32].

Los factores genéticos y ambientales que afectan a *C. elegans* son similares a aquellos que afectan a humanos, principalmente estrés oxidativo, restricción calórica y reducción en la masa muscular (sarcopenia) [33].

El reflejo de bombeo permanente en la faringe de *C. elegans* se ha aplicado para estudiar la digestión, la absorción y la bioactividad de las nanoemulsiones [34], [35].

En este trabajo, estudiamos el efecto de la ingestión por parte de *C. elegans* de NG copoliméricos de NIPAAm y el monómero básico DEAEM preparado por polimerización en emulsión sin jabón utilizando una forma polimerizable de polietilenglicol como estabilizador (polietilenglicol monometil metacrilato de éter) [36], [37]. Se utilizaron dos iniciadores para la síntesis de los NG, aniónico y catiónico.

2. Materiales y métodos

2.1. Materiales

N-isopropilacrilamida (NIPAAm) (Tokio Chemical Industry CO., LTD) se purificó mediante recristalización en hexano, 2-(diethylamino) metacrilato de etilo (DEAEM) se purificó mediante destilación a presión reducida. El dimetacrilato de etilenglicol (EGDMA) se purificó pasándolo a través de una columna rellena con resina eliminadora de hidroquinona y metilhidroquinona (ALDRICH). Diclorhidrato de 2,2-azobis-(2-metilpropionamina) (AIBA), persulfato de amonio (APS) (ALDRICH), polietilenglicol-metil éter metacrilato (PEGMA) con un peso de 2.080 g/mol. El metacrilato de fluoresceína fue sintetizado en el laboratorio de Biofarmacia UABC. *C. elegans*, *E. coli* OP50 fueron proporcionados por la Universidad de Navarra España.

2.2. Síntesis de nanogeles

Se sintetizaron NG NIPAAm:PEGMA:DEAEM 47:41:12 w% utilizando EGDMA como reticulante (3% mol con respecto a NIPAAm). Se disolvió un total de 500 mg de monómero en 50 ml de agua MiliQ. La solución se desgasificó con nitrógeno durante 30 min y posteriormente se calentó a 85 °C durante 30 minutos. Se añadieron AIBA o APS (2% mol con respecto a NIPAAm). Se preparó un lote de nanogeles que contenían metacrilamida de fluoresceína (0,5% mol con respecto a NIPAAm) usando APS como iniciador. En todos los casos, la reacción se llevó a cabo durante 45 minutos. Después de eso, los nanogeles se sometieron a diálisis contra agua para su purificación durante 5 días. El diámetro hidrodinámico, D_h , se obtuvo por dispersión de luz dinámica (DLS) usando el Zetasizer NanoNS (DTS1060; instrumental Malvern). El efecto de la temperatura sobre el tamaño de los nanogeles se evaluó de 20 a 50 °C.

2.3. Microscopia electrónica de barrido de emisión de campo

Las imágenes de microscopia electrónica de barrido de emisión de campo (FESEM) de las MG se adquirieron con un microscopio electrónico de barrido de emisión de campo, modelo JSM-7800F Prime. Con este fin, se esparció una gota de dispersión de micropartículas (0,4% en peso) sobre la superficie de una rejilla de cobre recubierta de carbón de malla 400. Se añadieron dos gotas de acetato de uranilo (2% en peso) a la rejilla. Las muestras se secaron en horno de vacío a 22°C durante 24 h. Las muestras secas se sujetaron a una varilla de muestras FESEM, se insertaron en la cámara de muestras y se observaron a 25 kV.

2.4. Preparación de placas con medios de crecimiento de nematodos (NGM).

Se preparó 1 L de agar para nematodos, con 3 g de NaCl, 27 g de agar bacteriológico, 2,5 g de pepsina, 965 mL de agua, 1g de CaCl₂. Los medios se esterilizaron en autoclave. Posteriormente se adicionó 1 mL de colesterol (5 mg/mL), 1 g MgSO₄, KH₂PO₄ (1 M) 25 mL, nistatina 10 mL (5 mg/mL), ampicilina 1 mL (5 mg/mL).

2.5. Colocación de los NG

En el fondo de las placas se colocaron 250 uL de NG, se colocaron 3.75 mL de agar preparado, se dejó secar y se agregaron 250 uL de NG. El estudio se realizó por triplicado. Por otro lado, se preparó una placa de control sin NG.

2.6. Colocación de *C. elegans* en placas

Para las pruebas de toxicidad, los nematodos se sincronizaron con la etapa de desarrollo L1 utilizando el método de sincronización de cloro.

Después de la eclosión de los gusanos (mínimo de 19 horas), se centrifugaron a 1400 rpm durante 4 minutos y se eliminó el sobrenadante. Se tomaron 10 µL del sedimento en un portaobjetos para observar al microscopio y contar los gusanos. Se colocó el volumen de sedimento necesario para tener un mínimo de 400 nematodos por caja Petri. Las placas se resguardaron a 20 °C durante 1-2 días hasta su desarrollo, sin que las larvas superaran el estadio L4.

2.7. Ingestión de los nanogeles por *C. elegans*

Para determinar si las nanopartículas fueron ingeridas por gusanos, se cultivaron nematodos N2 sincronizados en placas NGM bacterianas OP50 con NG marcados con fluoresceína. Después del tratamiento durante 2 h, los nematodos se lavaron tres veces durante 30 s en medio M9 y luego se colocaron en portaobjetos preparados con almohadillas de agar al 2% frescas. Los nematodos fueron anestesiados con azida de sodio (1%).

La presencia de NG marcados con fluoresceína ingeridos por los gusanos se visualizó en un microscopio de fluorescencia (Axioimager M1, Zeiss, Alemania) con una cámara acoplada (AxioCam Icc3, Zeiss, Alemania) y una fuente fluorescente (HBO 100, Zeiss, Alemania). Las imágenes fueron capturadas con el software ZEN (Zeiss, Alemania).

2.8. Tinción rojo Nilo

Los gusanos L4 cultivados en diferentes condiciones (concentraciones de nanogeles) se recolectaron y lavaron con Triton X-100 al 0,01% en solución salina tamponada con fosfato (PBST) y se fijaron en isopropanol al 40% durante 3 min. La tinción se realizó mediante la

adición de una solución de rojo Nilo (3 $\mu\text{g/ml}$) y la incubación (30 min) con balanceo suave a temperatura ambiente en la oscuridad. Los gusanos se lavaron en PBST y se montaron en una almohadilla de agarosa al 2% para visualización microscópica.

Se capturaron imágenes fluorescentes de gusanos teñidos con rojo Nilo en un estereomicroscopio Nikon SMZ18 (Nikon Instruments Inc., Japón) equipado con un sistema de epifluorescencia y una cámara digital a color refrigerada DS-F11C. Las imágenes se tomaron bajo un filtro GFP (Ex 480-500, DM 505; BA 535-550). El análisis de imágenes se realizó utilizando el programa ImageJ.

2.9. Estudio de tamaño de *C. elegans*

Al microscopio (Nikon SMZ18 Research Stereomicroscope) se tomaron al menos 30 fotos por placa para estudio luego de realizar la tinción correspondiente descrita anteriormente, luego de tomar las fotos se guardaron para estudiar el volumen y contenido de grasa del nematodo con el software ImagenJ-Win64.

2.10. Análisis estadístico

Todos los cálculos fueron analizados con IBM SPSS. Los experimentos se llevaron a cabo por triplicado en condiciones similares. Los resultados se expresaron como la media \pm DE. Se consideraron diferencias estadísticamente significativas cuando el valor de p fue inferior a 0,05.

Se calcularon las medias y los errores estándar. Para las comparaciones de grupos en el estudio in vivo, los datos se analizaron mediante análisis de varianza unidireccional (ANOVA) seguido de una prueba de comparación múltiple de Tukey-

Kremer con el software estadístico NCSSTM 11 (NCSS, LCC. Kaysville, EE. UU.). EE.UU). La diferencia se consideró significativa cuando $p < 0,05$ o $p < 0,001$.

3. Resultados

3.1. Síntesis y caracterización de nanogeles

Los nanogeles se produjeron de manera eficiente con rendimientos superiores al 80%.

La Figura 1. muestra la distribución de tamaño de los nanogeles iniciados con AIBA (A) y la distribución de tamaño iniciados con APS (B). Se observa un diámetro hidrodinámico (D_h) de 150 nm, así como un índice de polidispersión de ($PDI = 0,198$) para los NG iniciado con AIBA, mientras que para el NG iniciado con APS se obtiene un D_h de 160 nm y un ($PDI = 0,194$) y una temperatura de transición similar de 36 °C. En las dos síntesis el tamaño de los nanogeles son óptimas ya que permite la evaluación de toxicidad en los nematodos, el índice de polidispersión es el adecuado nos dice que los NG se encuentran distribuidos de una forma uniforme. Los tamaños nanométricos de los NG se corroboran con microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (FESEM) que se muestran en la (Figura 2).

La sensibilidad a la temperatura se presenta en la Figura 1. de 20 °C a 50 °C con una transición discontinua y un LCST así como su sensibilidad a la temperatura en agua AIBA (A1) y APS (B1). Ambos nanogeles presentan una temperatura de transición (LCST) de 36 °C ya conocida y estudiada pues por estudios anterior se sabe que NIPAAm tiene una LCST de 32 °C cercana a la temperatura corporal, y la incorporación de monómeros hidrofílicos incrementa la LCST

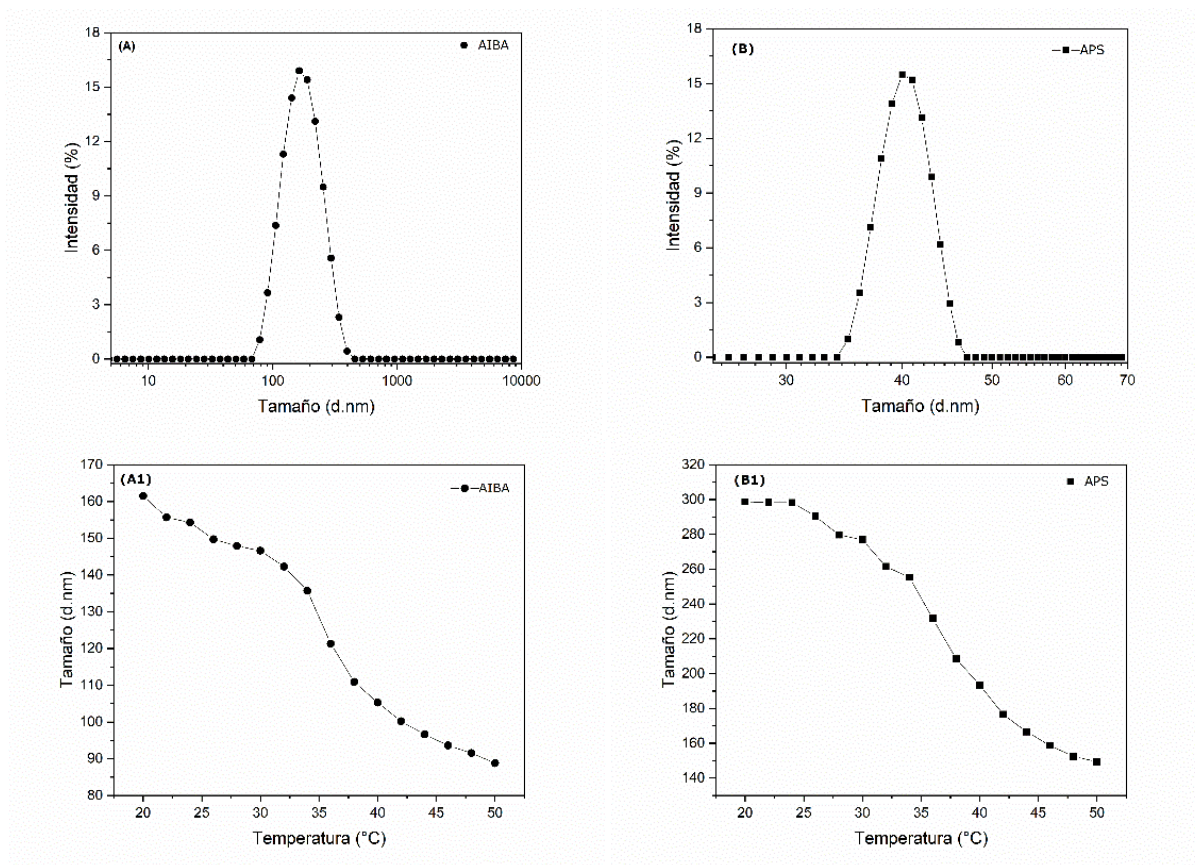


Figura 1. Distribución de tamaños de nanopartículas a 25 °C iniciadas con AIBA (A) o APS (B). Sensibilidad a la temperatura de los NGs con AIBA (A1) y APS (B1).

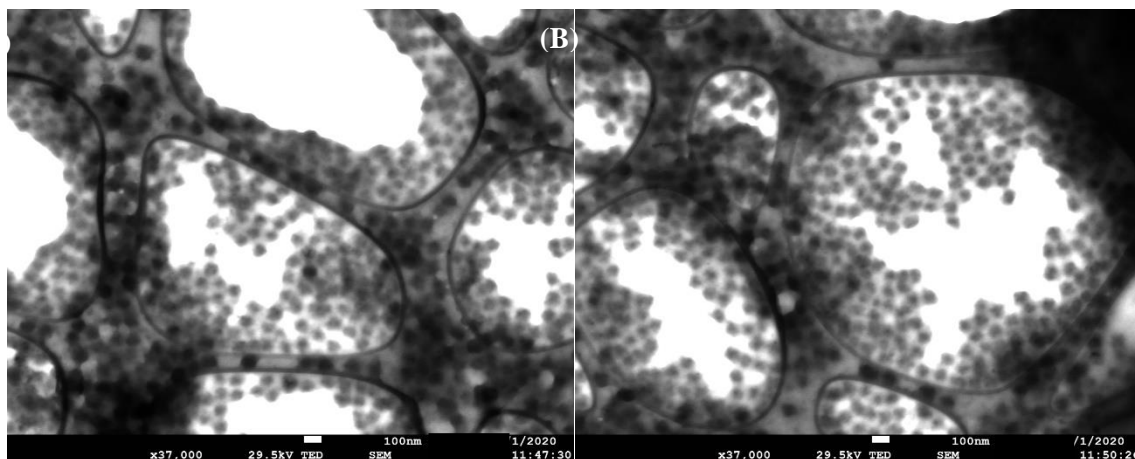


Figura 2. Imágenes de microscopio electrónico de barrido de emisión de campo (FESEM) de nanogeles iniciados con AIBA (A) y APS (B).

3.2. Ingestión de los nanogeles por *C. elegans*

En la Figura 3, se muestra la ubicación de los NGs marcados con fluoresceína en todo el tracto digestivo de *C. elegans*, lo que demuestra la

ingestión de materiales por parte del nematodo, teñido con rojo Nilo para observar el interior del nematodo.

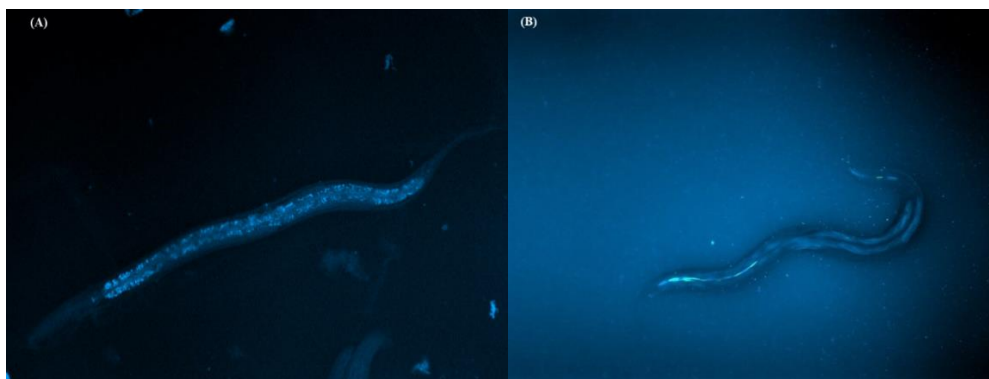


Figura 3. a) Muestra el control de la ingesta de NG por *C. elegans*, b) muestra la ingestión de NG marcado con fluoresceína por *C. elegans*.

3.3. Estudio de toxicidad.

En la Figura 4 se presentan los datos de toxicidad en *C. elegans*, se observó que en la gráfica (A) que los nematodos que ingirieron NG son más pequeños comparados con el control (NGM), pero también se observó que tienen mayor cantidad de grasa, esto nos lleva a los resultados de la gráfica (B) donde evaluamos la relación

grasa/volumen que nos indica que los nematodos son de tamaño pequeño, pero tienen un mayor volumen, esto comparando con el control, con lo que podemos concluir los nanogeles tienen efecto en el tamaño del nematodo teniendo un nematodo más pequeños pero aumentando su volumen generando un gusano más gordos.

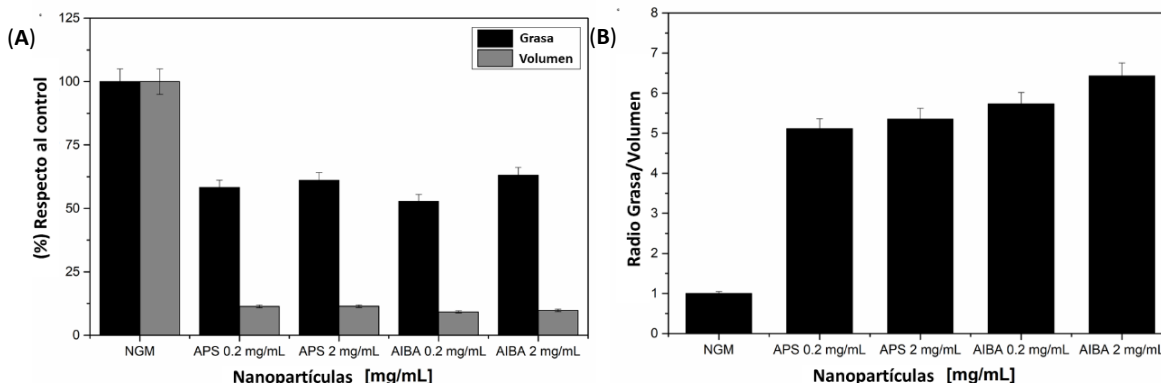


Figura 4. Estudios de toxicidad con respecto al volumen y grasa en *C. elegans*, donde en la imagen A se muestra el volumen y grasa del nematodo en términos de porcentaje (%) y en la imagen B se muestra el radio de la grasa y volumen del nematodo comparado con el control (NGM).

4. Discusiones

En microscopía de fluorescencia se observa que los nanogeles se distribuyen por todo el sistema gastrointestinal y digestivo del nematodo, lo que nos demuestra que *C. elegans* ingiere los biomateriales, ya que estos tienen un tamaño adecuado (120 a 180 nm) para poder ser ingerido por este tipo de nematodo. En estudios de toxicidad se concluyó que los nanogeles que se iniciaron con AIBA en comparación con APS tienen un mayor impacto en la grasa del nematodo, pero menor impacto en el volumen. La relación grasa-volumen indica que los nematodos alimentados con los nanogeles son pequeños, pero con gran cantidad de grasa, esto comparado con el control indica que los gusanos alimentados con los nanogeles son más grandes y gordos.

Los resultados indican que los nanogeles tienen cierto grado de toxicidad, lo que corrobora los resultados obtenidos en estudios previos usando cultivos celulares [5].

Se sabe que los materiales catiónicos interactúan con las membranas celulares (cargadas negativamente) provocando la ruptura de la membrana, seguida de la entrada de Ca^{2+} . La elevación del Ca^{2+} intracelular induce la desgranulación y el estrés oxidativo. La consecuencia de estos efectos es la citotoxicidad y la muerte celular [38].

Evaluar la toxicidad de nanomateriales sensibles utilizando el sistema *C. elegans* es una alternativa sólida para el desarrollo de biomateriales considerando que se utiliza un organismo vivo multicelular donde se puede estudiar el efecto sobre su funcionamiento y desarrollo.

5. Conclusiones

El nematodo *C. elegans* demostró ser un modelo viable para evaluar la toxicidad de nanopartículas responsivas. Esto resulta en una alternativa robusta para el desarrollo de biomateriales considerando que se utiliza un organismo vivo multicelular donde se puede estudiar el efecto sobre su funcionamiento y desarrollo, en trabajos a futuros se plantea realizar estudios *in vitro* en las mismas condiciones y con los mismos materiales que este trabajo y poder comparar los efectos en los dos modelos, así como también se plantea poder realizar estudios de cargado y liberación de fármacos para futuros estudios *in vivo*.

6. Reconocimiento de autoría

Alondra Montañez Rios: Conceptualización; Metodología; Investigación; Escritura- Borrador original; Escritura: revisión y edición. *Aracely Serrano Medina*: Escritura (Revisión y Edición), Recursos, Supervisión, administración del proyecto, gestión de fondos. *Juan M. Irache*: Metodología, validación, administración del proyecto, recursos, supervisión. *Ana L. Martínez López*: Metodología, Validación, administración del proyecto, recursos. *Ignacio Rivero*: Metodología, Validación, recursos. *Cornejo-Bravo*: Conceptualización, Análisis Formal, Visualización, Escritura (revisión y edición).

7. Agradecimientos

Los autores agradecen el financiamiento de la 23ª Convocatoria Interna de Apoyo a Proyectos de Investigación de la UABC y a la universidad de Navarra (UNAV).

Referencias

- [1] D. A. Castro-Vidal, D.A., C. Obeso-Vera, K.A. Suarez-Meraz, B.M. Lara-Molinero, A. Serrano-Medina, y J.M. "Thermal and pH Sensitive Nano/Microgels of N - Isopropylacrylamide and Carboxyalkyl Methacrylates", *Dig. J. Nanomater. Biostructures*, vol. 11, núm. 1, pp. 123-132, 2016.
- [2] Z. Shakoory et al., "Fluorescent multi-responsive cross-linked P(N-isopropylacrylamide)-based nanocomposites for cisplatin delivery", *Drug Dev. Ind. Pharm.*, vol. 43, núm. 8, pp. 1283-1291, 2017. <https://doi.org/10.1080/03639045.2017.1313859>
- [3] A. Serrano-Medina, J. M. Cornejo-Bravo, y A. Licea-Claverie, "Synthesis of Ph and Temperature Sensitive, Core-Shell Nano/Microgels, By One Pot, Soap-Free Emulsion Polymerization", *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 369, núm. 1, pp. 82-90, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2011.12.045>
- [4] K. Naseem, M. Atiq, U. Rehman, y R. Huma, "A Review on Vinyl Acetic Acid Based Polymer Microgels for Biomedical and Other Applications", vol. 4037, núm. July, 2017. <https://doi.org/10.1080/00914037.2017.1327434>
- [5] A. Serrano-Medina, I. Oroz-Parra, V. E. Gomez-Resendiz, A. Licea-Navarro, A. Licea-Claverie, y J. M. Cornejo-bravo, "Temperature and pH Sensitive Core-Shell Nanogels as Efficient Carriers of Doxorubicin with Potential Application in Lung Cancer Treatment", vol. 4037, núm. April, 2017. <https://doi.org/10.1080/00914037.2017.1297938>
- [6] W. H. Blackburn, E. B. Dickerson, M. H. Smith, J. F. McDonald, y L. A. Lyon, "Peptide-Functionalized Nanogels for Targeted siRNA Delivery", *Bioconjug. Chem.*, vol. 20, núm. 5, pp. 960-968, 2009. <https://doi.org/10.1021/bc800547c>
- [7] Y. M. Zhou et al., "Deposition Transfection Technology Using a DNA Complex with A Thermoresponsive Cationic Star Polymer", *J. Control. Release*, vol. 123, núm. 3, pp. 239-246, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2007.08.026>
- [8] A. Aqil et al., "Magnetic Nanoparticles Coated by Temperature Responsive Copolymers for Hyperthermia", *J. Mater. Chem.*, vol. 18, núm. 28, pp. 3352-3360, 2008. <https://doi.org/10.1039/b804003f>
- [9] M. Ballauff y Y. Lu, "'Smart' Nanoparticles: Preparation, Characterization and Applications", *Polymer (Guildf.)*, vol. 48, núm. 7, pp. 1815-1823, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2007.02.004>
- [10] W. Leobandung, H. Ichikawa, Y. Fukumori, y N. A. Peppas, "Monodisperse Nanoparticles of Poly(Ethylene Glycol) Macromers and N-Isopropyl Acrylamide For Biomedical Applications", *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 87, núm. 10, pp. 1678-1684, 2002. <https://doi.org/10.1002/app.11612>
- [11] C. L. Lin, W. Y. Chiu, y C. F. Lee, "Thermal/pH-sensitive core-shell copolymer latex and its potential for targeting drug carrier

application", *Polymer (Guildf.)*, vol. 46, núm. 23, pp. 10092-10101, 2005.
<https://doi.org/10.1016/j.polymer.2005.07.098>

[12] T. Hoare y R. Pelton, "with Physiological Swelling Activity", *Insulin*, pp. 733-740, 2008.
<https://doi.org/10.1021/bm701203r>

[13] X. Li, X. Li, X. Shi, G. Qiu, y X. Lu, "Thermosensitive DEA/DMA copolymer nanogel: Low initiator induced synthesis and structural colored colloidal array's optical properties", *Eur. Polym. J.*, vol. 96, pp. 484-493, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2017.08.024>

[14] A. Mellati, M. Valizadeh Kiamahalleh, S. Dai, J. Bi, B. Jin, y H. Zhang, "Influence of polymer molecular weight on the in vitro cytotoxicity of poly (N-isopropylacrylamide)", *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 59, pp. 509-513, 2016.
<https://doi.org/10.1016/j.msec.2015.10.043>

[15] A. S. Wadajkar, B. Koppolu, M. Rahimi, y K. T. Nguyen, "Cytotoxic evaluation of N-isopropylacrylamide monomers and temperature-sensitive poly(N-isopropylacrylamide) nanoparticles", *J. Nanoparticle Res.*, vol. 11, núm. 6, pp. 1375-1382, 2009.
<https://doi.org/10.1007/s11051-008-9526-5>

[16] H. Malonne et al., "Preparation of poly(N-isopropylacrylamide) copolymers and preliminary assessment of their acute and subacute toxicity in mice", *Eur. J. Pharm. Biopharm.*, vol. 61, núm. 3, pp. 188-194, 2005.
<https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2005.05.007>

[17] L. H. Lima, Y. Morales, y T. Cabral, "Ocular Biocompatibility of Poly-N-Isopropylacrylamide (pNIPAM)", *J. Ophthalmol.*, vol. 2016, 2016.
<https://doi.org/10.1155/2016/5356371>

[18] P. Van De Wetering, E. E. Moret, N. M. E. Schuurmans-Nieuwenbroek, M. J. Van Steenberghe, y W. E. Hennink, "Structure-activity Relationships of Water-Soluble Cationic Methacrylate/methacrylamide Polymers For Nonviral Gene Delivery", *Bioconjug. Chem.*, vol. 10, núm. 4, pp. 589-597, 1999.
<https://doi.org/10.1021/bc980148w>

[19] L. Kou, Y. D. Bhutia, Q. Yao, Z. He, J. Sun, y V. Ganapathy, "Transporter-Guided Delivery Of Nanoparticles To Improve Drug Permeation Across Cellular Barriers And Drug Exposure To Selective Cell Types", *Front. Pharmacol.*, vol. 9, núm. JAN, pp. 1-16, 2018.
<https://doi.org/10.3389/fphar.2018.00027>

[20] E. Blanco, H. Shen, y M. Ferrari, "Principles of Nanoparticle Design for Overcoming Biological Barriers To Drug Delivery", *Nat. Biotechnol.*, vol. 33, núm. 9, pp. 941-951, 2015.
<https://doi.org/10.1038/nbt.3330>

[21] E. Fröhlich, "The Role Of Surface Charge In Cellular Uptake And Cytotoxicity Of Medical Nanoparticles", *Int. J. Nanomedicine*, vol. 7, pp. 5577-5591, 2012.
<https://doi.org/10.2147/IJN.S36111>

[22] A. C. Anselmo y S. Mitragotri, "Nanoparticles in the Clinic: An Update", *Bioeng. Transl. Med.*, vol. 4, núm. 3, pp. 1-16, 2019.
<https://doi.org/10.1002/btm2.10143>

- [23] H. R. Culver, J. R. Clegg, y N. A. Peppas, "Analyte-Responsive Hydrogels: Intelligent Materials for Biosensing and Drug Delivery", *Acc. Chem. Res.*, vol. 50, núm. 2, pp. 170-178, 2017.
<https://doi.org/10.1021/acs.accounts.6b00533>
- [24] J. R. Clegg et al., "Synthetic Networks With Tunable Responsiveness, Biodegradation, And Molecular Recognition For Precision Medicine Applications", *Sci. Adv.*, vol. 5, núm. 9, pp. 1-16, 2019.
<https://doi.org/10.1126/sciadv.aax7946>
- [25] P. Ferro, L. Katerine, G. Bustos, y A. Viviana, "Caracterización Fenotípica De La Cepa N2 De *Caenorhabditis Elegans* Como Un Modelo En Enfermedades Neurodegenerativas", pp. 69-78.
- [26] T. Wu, H. Xu, X. Liang, y M. Tang, "*Caenorhabditis Elegans* as a Complete Model Organism For Biosafety Assessments Of Nanoparticles", *Chemosphere*, vol. 221, pp. 708-726, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.021>
- [27] L. González-Moragas, A. Roig, y A. Laromaine, "C. elegans as a Tool For In Vivo Nanoparticle Assessment", *Adv. Colloid Interface Sci.*, vol. 219, pp. 10-26, 2015.
<https://doi.org/10.1016/j.cis.2015.02.001>
- [28] G. M. Solis y M. Petrascheck, "Measuring *Caenorhabditis elegans* Life Span in 96 Well Microtiter Plates", núm. March, pp. 1-6, 2011.
<https://doi.org/10.3791/2496>
- [29] J. S. Gutierrez Sánchez, H. S. Castro Cárdenas, S. E. Giraldo Quintero, Y. Y. Lozano Jiménez, y R. M. Sánchez Mora, "*Caenorhabditis Elegans* Como Modelo De Estudio De Enfermedades Neurodegenerativas", *Ámbito Investig.*, vol. 5, núm. 2, pp. 24-33, 2020.
- [30] M. Uno y E. Nishida, "Lifespan-regulating Genes in *C. Elegans*", *npj Aging Mech. Dis.*, vol. 2, núm. 1, 2016.
<https://doi.org/10.1038/npjamd.2016.10>
- [31] A. K. Corsi, B. Wightman, y M. Chalfie, "A Transparent Window Into Biology: A Primer On *Caenorhabditis Elegans*", *Genetics*, vol. 200, núm. 2, pp. 387-407, 2015.
<https://doi.org/10.1534/genetics.115.176099>
- [32] A. Bansal, L. J. Zhu, K. Yen, y H. A. Tissenbaum, "Uncoupling Lifespan and Healthspan in *Caenorhabditis Elegans* Longevity Mutants", *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 112, núm. 3, pp. E277-E286, 2015.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1412192112>
- [33] A. V. G. Bustos, M. G. Jiménez, y R. M. S. Mora, "The *Annona Muricata* Leaf Ethanol Extract Affects Mobility and Reproduction In Mutant Strain NB327 *Caenorhabditis Elegans*", *Biochem. Biophys. Reports*, vol. 10, pp. 282-286, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.bbrep.2017.04.016>
- [34] D. Colmenares, Q. Sun, P. Shen, Y. Yue, D. J. McClements, y Y. Park, "Delivery of Dietary Triglycerides To *Caenorhabditis Elegans* Using Lipid Nanoparticles: Nanoemulsion-based delivery systems", *Food Chem.*, vol. 202, pp. 451-457, 2016.

<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.02.022>

[35] E. Sánchez, "Estudio De Un Modelo In Vivo De Los Mecanismos De Acción Implicados En La Actividad Biológica De Polifenoles." ' Evaluation Of Mechanisms of Action Involved In The Biological Activity Of Polyphenols Using An In Vivo Model.'", p. 31, 2017.

[36] L. Brannon-Peppas y J. O. Blanchette, "Nanoparticle and Targeted Systems for Cancer Therapy", Adv. Drug Deliv. Rev., vol. 64, núm. SUPPL., pp. 206-212, 2012.
<https://doi.org/10.1016/j.addr.2012.09.033>

[37] M. J. Mitchell, M. M. Billingsley, R. M. Haley, M. E. Wechsler, N. A. Peppas, y R. Langer, "Engineering Precision Nanoparticles for Drug Delivery", Nat. Rev. Drug Discov., vol. 20, núm. 2, pp. 101-124, 2021.
<https://doi.org/10.1038/s41573-020-0090-8>

[38] T. L. Hwang, I. A. Aljuffali, C. F. Lin, Y. T. Chang, y J. Y. Fang, "Cationic Additives In Nanosystems Activate Cytotoxicity And Inflammatory Response Of Human Neutrophils: Lipid Nanoparticles Versus Polymeric Nanoparticles", Int. J. Nanomedicine, vol. 10, pp. 371-385, 2015.
<https://doi.org/10.2147/IJN.S73017>

Derechos de Autor (c) 2022 Alondra Montañez-Ríos, Aracely Serrano-Medina, Juan M. Irache, Ana L. Martínez-López, Ignacio Rivero, José Manuel Cornejo-Bravo



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Usted es libre para compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato — y adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen del licencia](#) - [Textocompletodelalicensia](#)



La isla de calor urbano superficial y su manifestación en la estructura urbana de la Ciudad de México

The surface urban heat island and its manifestation in the urban structure of Mexico City

Itzia Gabriela Barrera Alarcón , Camilo Alberto Caudillo Cos , Sandra Lizbeth Medina Fernández 
Felipe Gerardo Ávila Jiménez , Jorge Alberto Montejano Escamilla 

Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial, Contoy 137, Col. Lomas de Padierna,
Alcaldía Tlalpan, CP. 14240, Ciudad de México, México

Autor de correspondencia: Itzia Gabriela Barrera Alarcón, Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial, Contoy 137, Col. Lomas de Padierna, Alcaldía Tlalpan, CP. 14240, Ciudad de México, México, E-mail: ibarrera@centrogeo.edu.mx, ORCID: 0000-0002-5561-7177.

Recibido: 21 de Junio del 2022

Aceptado: 28 de Septiembre del 2022

Publicado: 30 de Septiembre del 2022

Resumen. - *A partir del procesamiento de imágenes satelitales de alta y baja resolución (Landsat y Modis), el desarrollo de correlaciones bivariadas entre Temperaturas de Superficie Terrestre diurnas, nocturnas y 27 métricas asociadas a la estructura urbana y localización, este trabajo ha analizado la intensidad del fenómeno de la Isla de Calor Urbano en La Ciudad de México en uno de los meses más cálidos del año 2018. Esto ha permitido identificar las zonas más vulnerables ante dicho fenómeno y su asociación con las características de estructura urbana de la misma. En este sentido, se identificó que las temperaturas nocturnas más altas se encuentran a una menor distancia del centro de la Ciudad, es decir, en la zona más consolidada de la misma. La población de 65 o más años, que es la más vulnerable a sufrir problemas de salud asociados a las altas temperaturas por un problema de termorregulación corporal, se localizan en zonas de la ciudad donde se concentran las temperaturas nocturnas más altas. Asimismo, aunque en menor medida, se tiene una correlación directa con las altas temperaturas y las zonas de mayor densidad de vivienda, mayor superficie de calles pavimentadas y mayor concentración de unidades económicas por hectárea. Por el contrario, las zonas con las temperaturas nocturnas más bajas identificadas dentro de la Ciudad se localizaron en las zonas con mayores alturas sobre el nivel del mar, sobre pendientes más pronunciadas y con mayor superficie de áreas libres. Asimismo, la población de 0 a 14 años identificada también dentro del rango de vulnerabilidad a las altas temperaturas se localiza principalmente en las zonas con temperaturas moderadas y/o bajas en las zonas periurbanas principalmente. Por otro lado, para identificar las variaciones térmicas diurnas y nocturnas, tanto en suelo artificial como en suelo con cobertura natural, se generaron perfiles térmicos con mediciones a cada 1000 m, identificando también el uso de suelo. Este perfil térmico ha permitido observar oscilaciones térmicas más pronunciadas durante el día, localizando las temperaturas más altas en las áreas de cultivo, suelo habitacional y de uso mixto. Por el contrario, las temperaturas nocturnas se estabilizan y manifiestan el fenómeno de la Isla de Calor Urbano en el cual se muestra que las temperaturas más altas se concentran en la zona más densa de la ciudad (Alcaldía Cuauhtémoc y Alcaldía Benito Juárez), que han almacenado una mayor cantidad de calor debido a las características de los materiales y composición del entorno urbano, y las zonas con cobertura natural bajan debido a la facilidad para disipar el calor.*

Palabras clave: Isla de calor urbano superficial; Estructura urbana; Percepción remota.

Abstract. - *From the processing of high- and low-resolution satellite images (Landsat and Modis), the development of bivariate correlations between daytime and nighttime land surface temperatures, and 27 metrics associated with urban structure and location, this work has analyzed the intensity of the phenomenon of Urban Heat Island manifested in Mexico City in one of the warmest months of the year 2018 to identify the most vulnerable areas to this phenomenon and their urban structure characteristics. Thus, the highest temperatures are found at a shorter distance from the inner city, as the most consolidated area. The population aged 65 or over, which is the most vulnerable to health problems associated with high temperatures and body thermoregulation, is located in areas of the city where the highest night temperatures are concentrated. Likewise, to a lesser extent, there is a direct correlation between high temperatures and areas with higher housing density, a greater surface area of paved streets, and a greater concentration of economic units per hectare. On the contrary, the zones with the lowest temperatures identified within the City were located in areas with the greatest heights above sea level, on steeper slopes, and with a greater surface of open areas. Likewise, the population aged 0 to 14 years, also identified within the range of vulnerability to high temperatures, is located mainly in areas with moderate and/or low temperatures. On the other hand, to identify the diurnal and nocturnal thermal variations, both in artificial and natural cover soil and their land use, thermal profiles were generated with measurements at every 1000 meters. This has allowed it to observe more pronounced thermal oscillations during the day, with the highest temperatures in the cultivation areas, residential land, and mixed-use. On the contrary, night temperatures stabilize and manifest the phenomenon of the Urban Heat Island in which it is shown that the highest temperatures are concentrated in the densest area of the city (Alcaldía Cuauhtémoc and Alcaldía Benito Juárez), which have stored a greater amount of heat due to the characteristics of the materials and composition of the urban environment, and the areas with a natural cover go down due to the ease of dissipating heat.*

Keywords: Surface urban heat island; Urban structure; Remote sensing.



1. Introducción

El fenómeno de la Isla de Calor Urbana se ha definido como la diferencia térmica entre el área urbana y sus alrededores, siendo esta una clara manifestación del impacto de las actividades antropogénicas y el espacio para desarrollarlas. Se entiende que emerge como resultado de dos procesos diferentes pero asociados entre sí. El primero se refiere a la alteración de la cobertura del suelo, que pasa de ser suelo natural a suelo artificial, cuyos materiales normalmente poseen mayor inercia térmica. De tal manera que a mayor superficie construida, mayor es la alteración de los parámetros climáticos que contribuyen a regular el clima local [1].

El segundo proceso, se refiere a las actividades antropogénicas que se desarrollan en las ciudades asociadas, por una parte, a la generación y consumo energético [2]. Por tanto, la combinación de los efectos de dicho fenómeno, el crecimiento de la población urbana y las actividades inherentes a su desarrollo, así como la necesidad espacial para llevarlas a cabo están minando la seguridad de las ciudades [3].

A partir de su medición, las Islas de Calor Urbano pueden clasificarse en dos: i) las atmosféricas (ICUA), que se identifican a partir de la temperatura del aire localizada entre la capa dosel y la capa límite de la ICU; y ii) las superficiales (ICUS), que se evalúan a partir de las Temperaturas de Superficie Terrestre obtenidas mediante percepción remota. Sin embargo, aunque ambas poseen patrones espaciales similares, las ICUA suelen manifestar una mayor diferencia térmica durante la noche, mientras que las ICUS lo hacen en el día [3] [4] [5].

Asimismo, la intensidad de la ICU de una ciudad está sujeta a las métricas empíricas e indicadores utilizados para cuantificar el fenómeno. De tal manera que al analizar su esencia física, está determinada por una variedad de factores que se pueden clasificar a grandes rasgos en [6]:

- Externos: incluyen la ubicación (lat./lon.), el clima (en particular el viento), la proximidad a los cuerpos de agua (asociados con la circulación de la brisa del mar o lago), vegetación, etc.
- Intrínsecos: representan características específicas de la ciudad (por ejemplo, tamaño de la ciudad, fracciones de la cubierta terrestre, emisiones de calor antropogénicas, su estructura funcional, etc.

Sin embargo, ambas están ampliamente relacionadas a los usos de suelo y la morfología urbana, provocando contrastes térmicos en zonas expuestas a la radiación solar y otras al sombreado generado por las edificaciones [7].

Así, la manifestación de este fenómeno ha sido estudiado en diversas ciudades con distintas variaciones en cuestión de cantidad, temporalidad, tamaño, características de suelo (tipos de revestimiento en calles y carreteras, materiales de construcción, tipos de laminados, cantidad de áreas verdes y cuerpos de agua), procesos de planeación y estructura urbana, climatología [8] [9] [10][11], entre otros. Esto ha permitido vislumbrar estrategias que posibiliten la mejora de condiciones térmicas dentro de las ciudades, haciendo uso de una gran variedad de modelos numéricos diseñados para simular los procesos clave que rigen el intercambio de calor, humedad e impulso de la cubierta urbana.

Así, una de las recomendaciones para estos estudios de acuerdo T.R. Oke [12], es realizar trabajos comparativos entre ciudades con las mismas características haciendo referencia a la topografía, cuerpos de agua, clima (misma latitud, región climática y condiciones de nubosidad), tiempo (mismos días y periodos), e instrumentación de medición, ya que se ha demostrado la relación existente entre el tamaño de una aldea, pueblo o ciudad y la magnitud de la isla de calor urbano que esta

produce, siendo la población el parámetro más representativo para identificar el nivel de urbanización.

Por citar algunos ejemplos de casos de estudio, se encuentra el realizado por H. Tran [13] que a partir de imágenes MODIS reportaron 18 mega ciudades asiáticas donde correlacionaron la isla de calor urbano con la población de la ciudad, densidad de urbanización y cubierta vegetal. Por otra parte, M.L. Imhoff [14] también indicó que hay un ciclo diurno y estacional de la isla de calor urbano superficial mostrando que la isla de calor urbano superficial de verano (4.3°C) es más intensa que la isla de calor urbano de superficie de invierno (1.3°C) sobre las 38 ciudades con mayor población en todo Estados Unidos utilizando MODIS LST. Otro estudio a escala mundial [15] intenta representar la variación estacional de la intensidad de la isla de calor urbano superficial (SUHII) en 419 ciudades, evaluando diversos factores biofísicos y socioeconómicos a partir de la utilización de imágenes MODIS diurnas y nocturnas. La investigación demuestra que existe una correlación positiva con el albedo y la luz nocturna entre las áreas urbanas y sus alrededores con respecto a la Intensidad de la Isla de Calor Urbano Superficial (SUHII), mientras que la SUHII diurna presenta altas correlaciones negativas con respecto a la cantidad de cobertura natural y el tipo de actividades que se desarrollan en las zonas urbanas y suburbanas. Oleson por su lado [16], emplea un esquema urbano dentro de un Modelo Climático Global (GCM) para cuantificar el impacto potencial de los techos blancos como una estrategia de mitigación del clima.

Las diferentes manifestaciones de la SUHII durante ciertos periodos de tiempo en un

espacio determinado, son otros de los aspectos que se evalúan para entender los diferentes procesos urbanos que afectan dicho fenómeno. Un ejemplo es el estudio realizado por J. Peng [17] en la ciudad de Beijing el cual evalúa la manifestación de la ICU a partir de los cambios morfológicos y sistemas de conectividad del año 2000 al 2015. Los resultados muestran que estos procesos incidieron en el incremento de la superficie asociada a la conectividad y las altas temperaturas, generando así un gran archipiélago de calor urbano que ha llegado a ocupar hasta el 79.85% de la superficie de la ciudad. Otro trabajo desarrollado en la ciudad de Rotterdam por L. Van Hove et al [18], integra al estudio de la variación espacio temporal 2010-2012, en este caso, a la isla de calor urbano atmosférica, los parámetros del confort térmico viéndose afectado principalmente en las zonas donde se manifiesta más intensamente la ICUA en los meses de verano.

Por otro lado, en México se han desarrollado diversos trabajos en torno al estudio de la Isla de Calor Urbana tanto atmosférica como superficial [19][20][21][22][23][24][25].

Aquellas que han analizado dicho fenómeno en ciudades de clima templado o cálido-húmedo, han determinado que las temperaturas más altas se presentan en las zonas céntricas y de mayor densidad edificatoria, principalmente por el tipo de materiales utilizados en las superficies, el uso de suelo, la falta de vegetación, y el empleo excesivo de sistemas de refrigeración al interior de las edificaciones. Por el contrario, aunque han sido más escasos, aquellos estudios realizados en ciudades con clima cálido-seco, demuestran que las zonas más densas de la ciudad se manifiestan como Islas Urbanas de Frío, siendo las periferias y las

zonas más dispersas las que registraron las temperaturas diurna más altas [2] [17] [23].

La mayoría de estos estudios se han enfocado en el análisis del fenómeno de la ICU atmosférica en la microescala a partir del empleo de datos monitoreados por diversas estaciones meteorológicas [19][20][21][23][24][25]. El uso de percepción remota para el análisis de la ICU Superficial, por el contrario, ha sido menos utilizado en el país para estudiar el fenómeno a escala local o meso escala [22][27][2][26]. Sin embargo, el trabajo realizado por Navarro-Estupiñán [27], integra a su análisis métricas de la estructura urbana funcional asociadas a la vulnerabilidad térmica y su relación espacial con la ICU Superficial en la ciudad de Hermosillo.

Así, el objetivo de este trabajo es el de identificar las zonas más vulnerables ante el fenómeno de la Isla de Calor Urbano a partir de su localización y su relación con diversos elementos que conforman la estructura¹ urbana de la ciudad. De tal manera que los resultados puedan ser considerados para la integración de la política pública y planeación de la Ciudad de México.

2. Metodología

2.1. Área de estudio

Este trabajo se enfoca en el estudio del fenómeno de la Isla de Calor Urbano Superficial generado en la Ciudad de México, que con más de 9 millones de habitantes y una extensión de casi mil 500 km², forma parte de la zona Metropolitana del Valle de México [28].

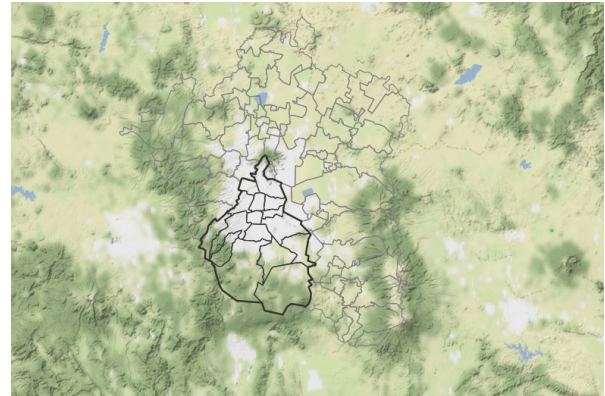


Figura 1. Límite estatal de la Ciudad de México en la Zona Metropolitana del Valle de México. Fuente: [29]

Su temperatura media anual es de 16°C, con una máxima media anual de 25°C y mínima media anual de 5°C. Además de concentra cuatro tipos de clima: templado subhúmedo, semifrío subhúmedo, semifrío húmedo y semiárido seco. Gran parte de la Ciudad se localiza a una altura de 2,240 msnm [30].

2.2. Metodología, materiales y método

Para identificar y analizar la Isla de Calor urbano Superficial de la Ciudad de México, se desarrolló una metodología que consta de cuatro etapas: extracción y procesamiento de información de percepción remota; generación y análisis de información de estructura urbana; desarrollo de Correlaciones bivariadas a partir del Índice de Correlación de Pearson; y análisis de resultados.

¹ Para este trabajo, se aborda la estructura urbana desde su ámbito funcional y no morfológico.

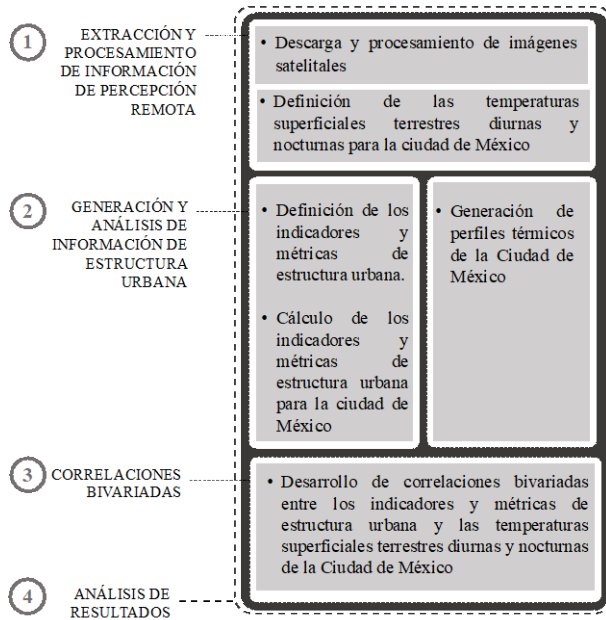


Figura 2. Proceso metodológico implementado en la investigación. Fuente: elaboración propia.

2.3. Extracción y procesamiento de información de percepción remota.

Algunos de los sensores TIR actuales transmitidos por satélite pueden proporcionar mediciones de la Temperatura Superficial Terrestre (LST por sus siglas en inglés Land Superficie Temperature) a una resolución espacial razonablemente alta. Su utilización en estudios de clima urbano está restringida debido a la baja resolución temporal y a los limitados datos de imágenes disponibles durante la noche [31].

De acuerdo con un estudio encabezado por Weng [32], ningún sistema de satélites en la actualidad proporciona datos TIR de cobertura global que combine altas resoluciones espaciales y temporales. De tal manera que se han desarrollado diversas técnicas para poder mejorar estas dos características, tales como la fusión de imágenes, la fusión imagen-datos, la nitidez espacial, la reducción de escala y la desagregación (afilado térmico espacial y las técnicas de afilado térmico temporal).

Por tanto, para este trabajo se obtendrán datos de LST de día mediante Landsat a 30 m y LST de noche a través de Modis a 1 km. Para esta última será necesaria la aplicación de la técnica de afilamiento térmico espacial que permita pasar de una resolución espacial baja a un alta mediante el algoritmo TsHARP. De acuerdo a Agam, N. et al. 2007, la técnica de TsHarp se basa en la supuesta relación entre el NDVI y la LST dentro de una escena del sensor. Sin embargo, la pendiente de esta relación varía con la cobertura del suelo y el clima, por lo que, esta metodología es muy específica al área de estudio o escena, siendo recomendable no aplicar en áreas grandes [33].

Así, la metodología empleada para el trabajo de percepción remota se desarrolló en 4 etapas: descarga de imágenes satelitales de alta resolución (Landsat8) y de baja resolución (Modis); calibración de bandas Landsat; cálculo de la Temperatura de Superficie Terrestre (LST); e integración de resultados de distintas escalas

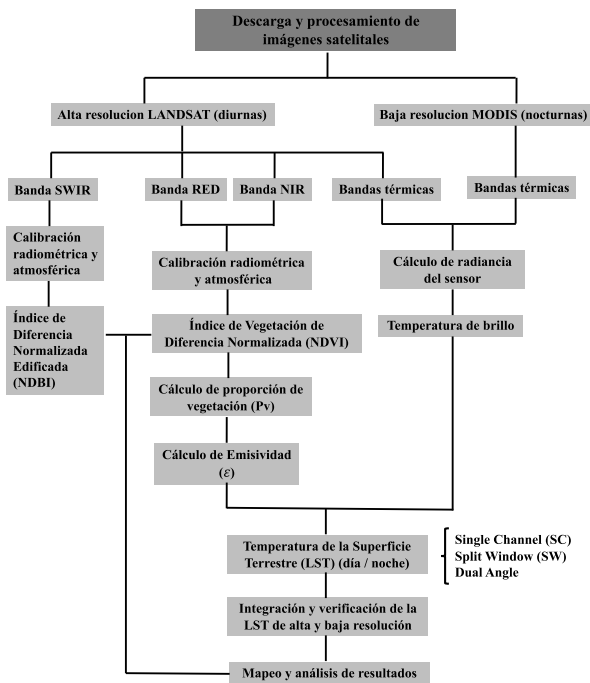


Figura 3. Metodología de percepción remota. Fuente: elaboración propia.

a) Imágenes satelitales de alta resolución Landsat. Para la Ciudad de México se descargó una escena Landsat 8 mediante la plataforma del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) [34]. La imagen diurna seleccionada corresponde al día 8 de mayo del año 2018. Su descarga y procesamiento se generó a partir dicha plataforma empleando sus insumos y métodos de procesamiento.

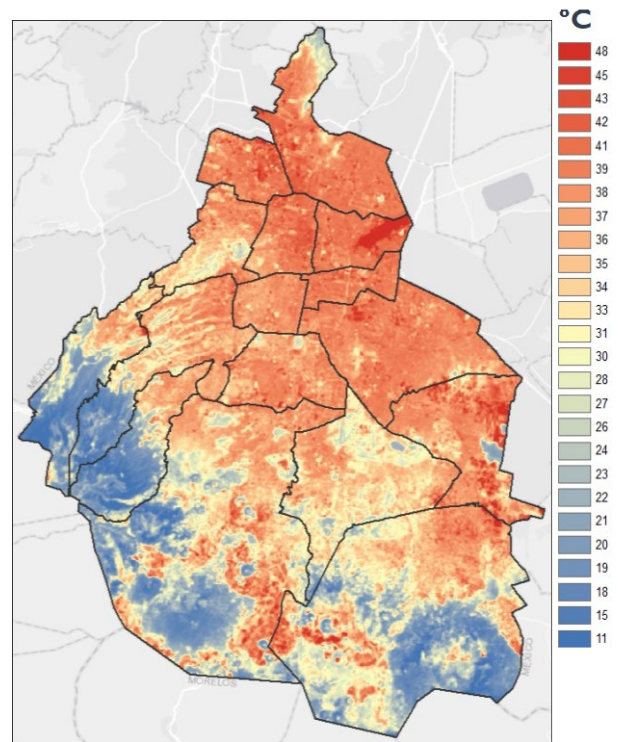


Figura 4. LST (Landsat) Diurna de la Ciudad de México. Fuente: elaboración propia.

b) Imágenes satelitales de baja resolución Modis. La temperatura superficial del terreno (LST) para el sensor Modis fue descargado como producto MOD11A2 v006 y MYD11A2 v006, proporcionada como promedio de 8 días por píxel con una resolución de 1 kilómetro.

Dado que al ser descargadas las escenas ya cuentan con el resultado de LST, únicamente se realiza la re-proyección a la zona UTM correspondiente y el recorte al tamaño del área de estudio, además dado que el resultado se encuentra en un rango válido de 7 500 a 65 535, este debe ser multiplicado por el factor de escala 0.02 y al resultado restarle -273.15 para convertir de grados Kelvin a Celsius.

2.4. Integración de resultados de distintas escalas.

Para este trabajo se han obtenido los datos de LST de día mediante Landsat a 30 m y LST de noche a través de Modis a 1 km, por lo que ha sido necesario aplicar la técnica de afilamiento térmico espacial en Modis para pasar de una resolución espacial baja a un alta mediante el algoritmo TsHARP. De acuerdo a Agam [35], la técnica de TsHarp se basa en la supuesta relación entre el NDVI y la LST dentro de una escena del sensor. Sin embargo, la pendiente de esta relación varía con la cobertura del suelo y el clima [33].

2.5. Verificación de resultados

Una vez obtenidos los resultados de la técnica de afilamiento térmico, estos fueron evaluados con el resultado original de la Temperatura de Superficie Terrestre de los productos MOD11A2 v006 y MYD11A2 v006 correspondiente. De acuerdo a Agam [35], propone la evaluación de precisión de recuperación, en donde mide el nivel de acuerdo entre los campos de temperatura de referencia (T_{Rref}) y de la temperatura con la técnica aplicada ($\widehat{T_{Rhigh}}$) se evalúan mediante el Error medio Absoluto (MAE) y el Error Medio Cuadrático (RMSE). Calculando con las siguientes formulas:

$$RMSE = \left[n^{-1} \sum_{i=1}^n (\widehat{T_{Rhigh}} - T_{Rref})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$MAE = \left[n^{-1} \sum_{i=1}^n |\widehat{T_{Rhigh}} - T_{Rref}| \right] \quad (2)$$

Tabla 1. Resultados de RMSE, MAE y R. Fuente: elaboración propia.

CIUDAD	EVALUACIÓN		
	MAE	RMSE	R
Ciudad de México	0.49	0.58	0.991116
	DIFERENCIA DE TEMPERATURAS		
	Dif max (absoluta)	Dif min (absoluta)	Promedio (absoluto)
	0.24	0.85	0.34

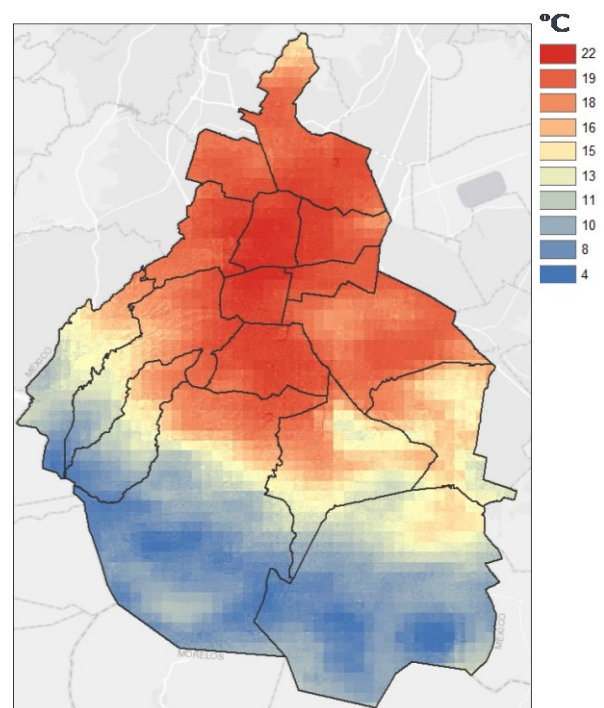


Figura 5. LST (Modis) nocturna de la Ciudad de México. Fuente: elaboración propia.

2.6. Generación y análisis de información de estructura urbana.

Una vez obtenidas las imágenes LST tanto diurnas y nocturnas de la Ciudad de México, se generó la cartografía térmica por Área Geoestadística Básica (AGEB), considerando la mediana de las temperaturas por píxel localizados dentro de los límites de cada una de

ellas. Esto se realizó tanto para las temperaturas superficiales diurnas como nocturnas.

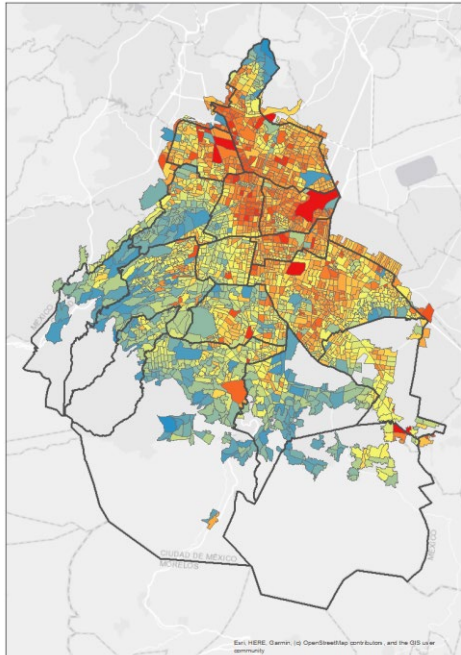


Figura 6. Mapa de temperaturas superficiales diurnas por AGEB. Fuente: elaboración propia

°C

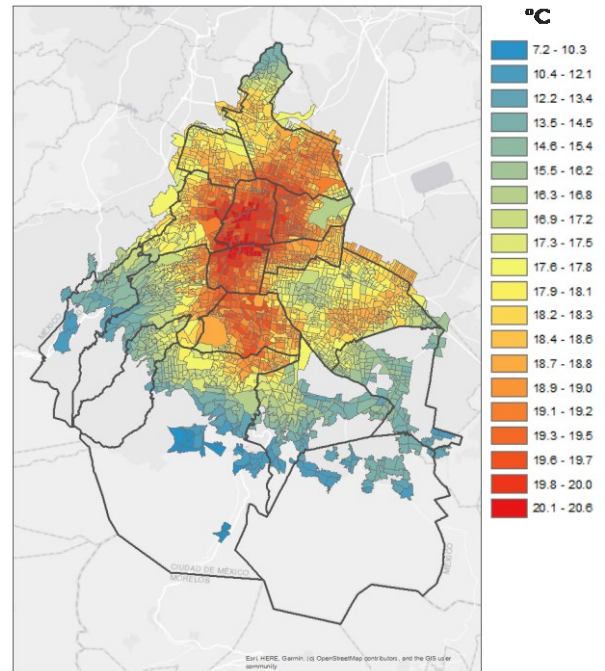


Figura 7. Mapa de temperaturas superficiales nocturnas por AGEB. Fuente: elaboración propia.

Asimismo se retomaron 25 de las métricas empleadas en el trabajo de investigación Forma Urbana y productividad en México 1995-2015 [36], asociadas a la estructura urbana, y se emplearon dos más correspondientes a la localización: altura y pendiente.²

Tabla 2. Tabla de indicadores. Fuente: elaboración propia.

Indicador	Medida	Fuente	Fórmula
1. Distancia	Distancia al centro de la ciudad KM	INEGI. Marco Geoestadístico Nacional, 2015	Distancia euclidiana al centro de la ciudad, calculada a partir de los centroides de ageb en Km.
2. Densidad habitacional	Densidad habitacional (neta)	INEGI. Marco Geoestadístico Nacional, 2016	Vivienda / hectárea
3. Construcción vs área libre	Índice de ocupación del suelo	Área construida y libre identificada a partir de la percepción remota de imágenes RapidEye 2016 obtenidas del proyecto de Forma Urbana y Productividad en México, CentroGeo 2018-2019.	Área construida / área libre

Revista de Ciencias Tecnológicas (RECIT). Volumen 5 (3): 312-330.

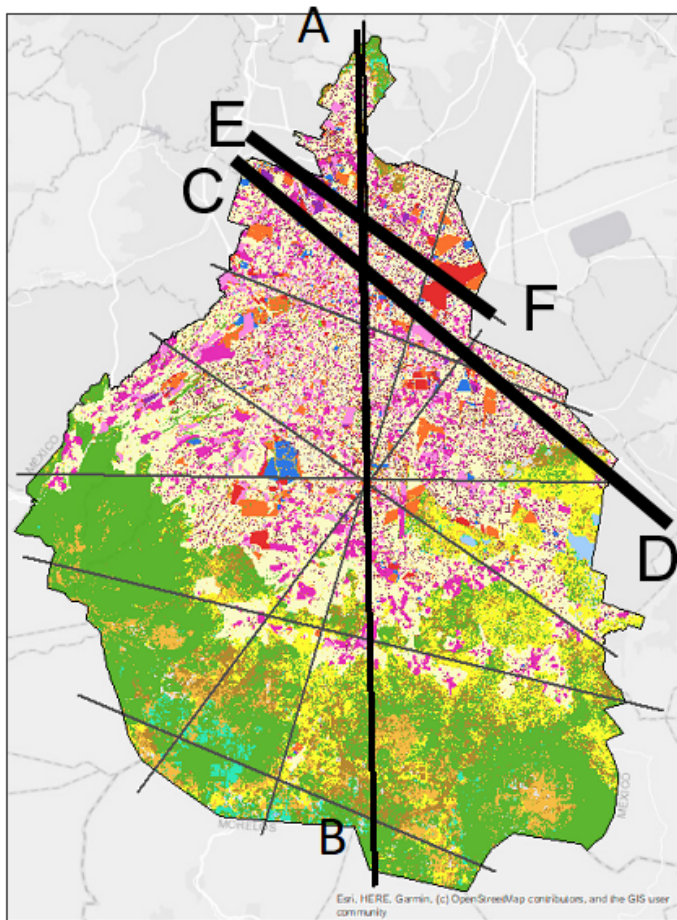
4. Suficiencia vial y personal ocupado	Índice de Saturación Vial (PO)	Manzanas del Inventario Nacional de Vivienda 2016 (INV 2016), vialidad del Scince 2015 (Scince 2015) y AGEB del Marco Geoestadístico Nacional 2015 MGN (2015).	Longitud total de vialidad en el AGEB / raíz cuadrada de la / (superficie construida * personal ocupado promedio) * 100.
5. Suficiencia vial y población	Índice de Saturación Vial (Pob)	Manzanas del Inventario Nacional de Vivienda 2016 (INV 2016), vialidad del Scince 2015 (Scince 2015) y AGEB del Marco Geoestadístico Nacional 2015 MGN (2015).	Longitud total de vialidad en el AGEB / raíz cuadrada de la / (superficie construida * población del AGEB) * 100
6. Suficiencia vial por personal ocupado y población	Índice de Saturación Vial (PO+Pob)	Manzanas del Inventario Nacional de Vivienda 2016 (INV 2016), vialidad del Scince 2015 (Scince 2015) y AGEB del Marco Geoestadístico Nacional 2015 MGN (2015).	Longitud total de vía * (Personal Ocupado + población residente) / raíz cuadrada (superficie vial + espacio público)*100.
7. Concentración urbana física	Concentración urbana (física)	INV 2016 y DENUE 2016, INEGI.	(Unidades económicas + viviendas en una manzana) / superficie construida de la manzana.
8. Concentración urbana funcional	Concentración urbana (funcional)	INEGI. Marco Geoestadístico Nacional, 2015.	(Total de habitantes + personal ocupado en una manzana) / (viviendas + UE de la manzana).
9. Unidades económicas por hectárea	Distribución territorial de UE	INEGI. Marco Geoestadístico Nacional, 2015. Sistema de Integración Territorial (ITER), 2010. Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE), 2016.	Unidades económicas / superficie de AGEB en hectáreas
10. Relación de empleos con ocupación	Relación de la población ocupada con la población económicamente activa ocupada	INEGI. Marco Geoestadístico Nacional, 2015. Sistema de Integración Territorial (ITER), 2010. Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE), 2016.	Personal Ocupado promedio / población económicamente activa ocupada
11. Coeficiente de ocupación del suelo	% de suelo construido	INEGI. Marco Geoestadístico Nacional, 2015. Área construida y libre identificada a partir de la percepción remota de imágenes RapidEye 2016 obtenidas del proyecto de Forma Urbana y Productividad en México, CentroGeo 2018-2019	Superficie construida / superficie total por AGEB
12. Porcentaje de vialidad y espacio público	% de espacio público y vial	INEGI. Marco Geoestadístico Nacional, 2015. INV 2016, INEGI	(Área vial + área libre) * 100) / superficie total del AGEB
13. Porcentaje de área libre	% de áreas libres	INEGI. Marco Geoestadístico Nacional, 2015. Área construida y libre identificada a partir de la percepción remota de imágenes RapidEye 2016 obtenidas del proyecto de Forma Urbana y Productividad en México, CentroGeo 2018-2019	área libre en el AGEB / superficie del AGEB * 100
14. Porcentaje de población	% de pob. 0 a 14 años de edad	INEGI. Marco Geoestadístico Nacional, 2015. INEGI. Sistema de Integración Territorial (ITER), 2010	(Población de 0 a 14 años / Población total) * 100

de 0 a 14 años			
15. Porcentaje de población de 65 años y más	% de pob. 65 y más años de edad	INEGI. Marco Geoestadístico Nacional, 2015. INEGI. Sistema de Integración Territorial (ITER), 2010	Población de 65 años y más / población total) * 100
16. Personal ocupado por unidad económica	Número de personas ocupadas por unidad económica	INEGI. Marco Geoestadístico Nacional, 2015. INEGI. Sistema de Integración Territorial (ITER), 2010. Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE), 2016	Total de PO / Total de UE en el AGEB
17. Porcentaje de calles pavimentadas	Materiales vialidad	en INEGI. Marco Geoestadístico Nacional, 2015. INEGI. Sistema de Integración Territorial (ITER), 2010	longitud de vías pavimentadas / longitud total de vía en el AGEB
18. Porcentaje de áreas verdes	Camellones y áreas verdes	INEGI. Marco Geoestadístico Nacional, 2015. Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE), 2016	(Superficie de áreas verdes / superficie total del AGEB) * 100
19. Porcentaje de comercio y servicios	Comercios y servicios	INEGI. Marco Geoestadístico Nacional, 2015. Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE), 2016	(Superficie de comercio y servicios / superficie total del AGEB) * 100
20. Porcentaje de equipamiento	Equipamiento	INEGI. Marco Geoestadístico Nacional, 2015. Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE), 2016	(Superficie de equipamiento / superficie total del AGEB) * 100
21. Porcentaje de uso habitacional	Superficie habitacional	INEGI. Marco Geoestadístico Nacional, 2015. Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE), 2016	(Superficie de uso habitacional / superficie total del AGEB) * 100
22. Porcentaje de industria	Superficie industrial	INEGI. Marco Geoestadístico Nacional, 2015.	(Superficie de industria / superficie total del AGEB) * 100
23. Porcentaje de uso mixto	Superficie con usos mixtos	INEGI. Marco Geoestadístico Nacional, 2015. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. INV 2016.	(Superficie de usos mixtos / superficie total del AGEB) * 100
24. Porcentaje de uso mixto especializado	Superficie con usos mixtos especializados	INEGI. Marco Geoestadístico Nacional, 2015. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. INV 2016.	(Superficie de usos mixtos especializados / superficie total del AGEB) * 100
25. Porcentaje de otros usos	Superficie con otros usos	INEGI. Marco Geoestadístico Nacional, 2015.	(Superficie de otros usos / superficie total del AGEB) * 100
26. Altura	Altura sobre el nivel del mar	INEGI. Continuo de Elevaciones Mexicano	Altura sobre el nivel del mar donde se localiza en AGEB
27. Pendiente	Grados	INEGI. Continuo de Elevaciones Mexicano	Grados de inclinación del terreno del AGEB.

2.7. Desarrollo de perfiles térmicos

A partir de los usos de suelo de planeación para La Ciudad, el Mapa prototipo de Cobertura y Uso de la Tierra de México³, y las temperaturas superficiales diurnas y nocturnas obtenidas, se realizaron tres perfiles térmicos (A-B, C-D, E-F) – empleando una serie de puntos localizados a cada 1000 m entre sí y cuyo objetivo es el de identificar la magnitud térmica diurna y nocturna generada por el tipo de cobertura y uso de suelo, dentro y fuera de los límites urbanos

de la Ciudad de México. La localización del perfil A-B busca identificar estas métricas en la sección más grande de La Ciudad que va de norte a sur y que pasa por las zonas más consolidadas hasta aquellas con mayores áreas de coberturas naturales. El perfil E-F atraviesa una sección al norte va de norponiente a suroriente donde se localiza suelo industrial y equipamiento internacional (el Aeropuerto Internacional Benito Juárez). El perfil C-D se localiza también la zona norte de La Ciudad abarcando la zona de mayor consolidación urbana y con mayor mezcla de usos de suelo.



Cobertura y uso de suelo



Figura 8. Localización de perfiles térmicos

³ Desarrollado en el proyecto “Climate Change Initiative CCI-Land Cover project 2017, por la Agencia Espacial Europea de Sentinel-2

2.8. Correlaciones bivariadas

Finalmente, para establecer las asociaciones entre los indicadores de estructura urbana y localización con las Temperaturas de Superficie Terrestre diurnas y nocturnas, se calculó el índice de correlación de Pearson (de producto momento) y posteriormente se filtraron aquellas variables que tuvieran un índice absoluto mayor que 0.15.

3. Resultados y discusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos en el procesamiento de las imágenes diurnas y nocturnas, y el cálculo de los indicadores de estructura urbana y localización por AGEB, la aplicación del índice de Pearson muestra en la tabla 3, las correlaciones bivariadas positivas y negativas de mayor peso en torno a la temperatura superficial terrestre diurna.

Tabla 2. Índice de Pearson con Temperaturas de Superficie Terrestre Diurnas. Fuente: elaboración propia

Variables con correlaciones > 0.15 con LandSat	
Indicador	Correlación
Coefficiente de Ocupación de Suelo (COS)	0.500
Densidad habitacional	0.312
Unidades económicas por hectárea	0.260
Porcentaje de calles pavimentadas	0.242
Unidades económicas	0.201
Suficiencia vial y personal ocupado	-0.185
Superficie vial	-0.189
Suficiencia vial y personal ocupado	-0.228
Superficie de área libre	-0.401
Distancia al centro de la ciudad	-0.445
Pendiente	-0.471
Porcentaje de vialidad y espacio público	-0.484
Porcentaje de área libre	-0.530
Altura	-0.555

Los resultados indican que, para la Ciudad de México, hay una correlación positiva que varía entre el 0.5 y el 0.201 entre las temperaturas

diurnas más altas y las zonas con un mayor COS, donde se localiza una mayor densidad habitacional, una mayor concentración de unidades económicas por hectárea y donde hay un mayor porcentaje de calles pavimentadas.

Asimismo, las correlaciones negativas más significativas - que van desde el -0.555 al -0.185 -, demuestran que las zonas que se localizan a mayor altura (en el rango de entre 2 221 y 3 069 msnm) en la Ciudad mantienen las menores temperaturas diurnas, así como en las zonas donde hay un mayor porcentaje y superficie de área libre, un mayor porcentaje de vialidad y espacio público, así como las zonas localizadas en superficies con mayor pendiente y cuya distancia al centro es menor.

En cuanto a las variables con correlaciones positivas más significativas entre las temperaturas nocturnas y los diferentes elementos de la estructura urbana y localización, en la figura 8 se observa una variación entre 0.476 y 0.152. La correlación más fuerte es de 0.476 y corresponde a la temperatura de Landsat, es decir, en las zonas donde se presentan las temperaturas nocturnas más altas también corresponden a las mayores temperaturas diurna.

Asimismo, se identifica que uno de los sectores de la población más vulnerable debido al problema de termorregulación corporal asociado a la edad, que oscila entre los 65 o más años, se encuentra localizado en las zonas donde se presentan las temperaturas nocturnas más altas. Asimismo, y al igual que en las temperaturas diurnas más altas, en las zonas con mayor densidad habitacional, mayor porcentaje de calles pavimentadas y mayor concentración de unidades económicas por hectárea, se localizan también las temperaturas nocturnas más altas.

Sin embargo, la correlación más significativa entre las distintas variables y las temperaturas fue de -0.826 y es la asociada a la distancia al centro de la ciudad, es decir, que mientras más alejado se esté de la zona más consolidada de la ciudad, menor temperatura se tendrá. Asimismo, la variable de la altura tiene un peso significativo de -0.723, lo que explica que las zonas más altas dentro de la ciudad disipan el calor más rápido que las zonas bajas.

También se identifica que el segundo sector más vulnerable por edad que va de 0 a 14 años (-0.496), en realidad se localizan en las zonas donde se concentran en menor medida las temperaturas nocturnas altas, así como las zonas con mayor pendiente (-0.401), mayor porcentaje de área libre (-0.392) y donde se tiene mayor superficie vial por personal ocupado y población (-0.373).

En cuanto a los perfiles térmicos, el primero de ellos que muestra el corte A-B (figura 9) y que cruza la ciudad de norte a sur, se puede observar una mayor oscilación térmica que varía entre los 30 y los 42.5 °C durante el día tanto, en la zona urbana como en las afueras de la misma. Algunos de los usos de suelo habitacional, mixtos y mixto especializado, son los que mantienen las temperaturas más altas a lo largo del perfil, pero sobre todo en la parte sur de la ciudad.

Asimismo, las áreas de cultivo localizadas al sur de la ciudad, es una de las coberturas

naturales que presenta las temperaturas más altas, por el contrario, a las áreas cubiertas por árboles.

Tabla 3. Índice de Pearson con Temperaturas de Superficie nocturnas. Fuente elaboración propia.

VARIABLES CON CORRELACIONES > 0.15 CON MODIS	
Indicador	Correlación
LandSat	0.476
Población 65 o más	0.460
Densidad habitacional	0.386
Porcentaje de calles pavimentadas	0.307
Unidades económicas por hectárea	0.272
Población ocupada	0.226
COS	0.200
Unidades económicas	0.169
Porcentaje de uso mixto	0.158
Vivienda	0.152
Porcentaje de vialidad y espacio público	-0.193
Longitud de vía por manzana	-0.330
Suficiencia vial por personal ocupado y población	-0.373
Porcentaje de área libre	-0.392
Pendiente	-0.401
Población de 0 a 14 años	-0.496
Altura	-0.723
Distancia al centro de la ciudad	-0.826

Por otro lado, en cuanto a las temperaturas nocturnas distribuidas en el perfil, se puede observar una mayor estabilidad en las mismas, concentrando las temperaturas más altas de manera más uniformemente en la zona urbana y las más bajas en el área circundante.

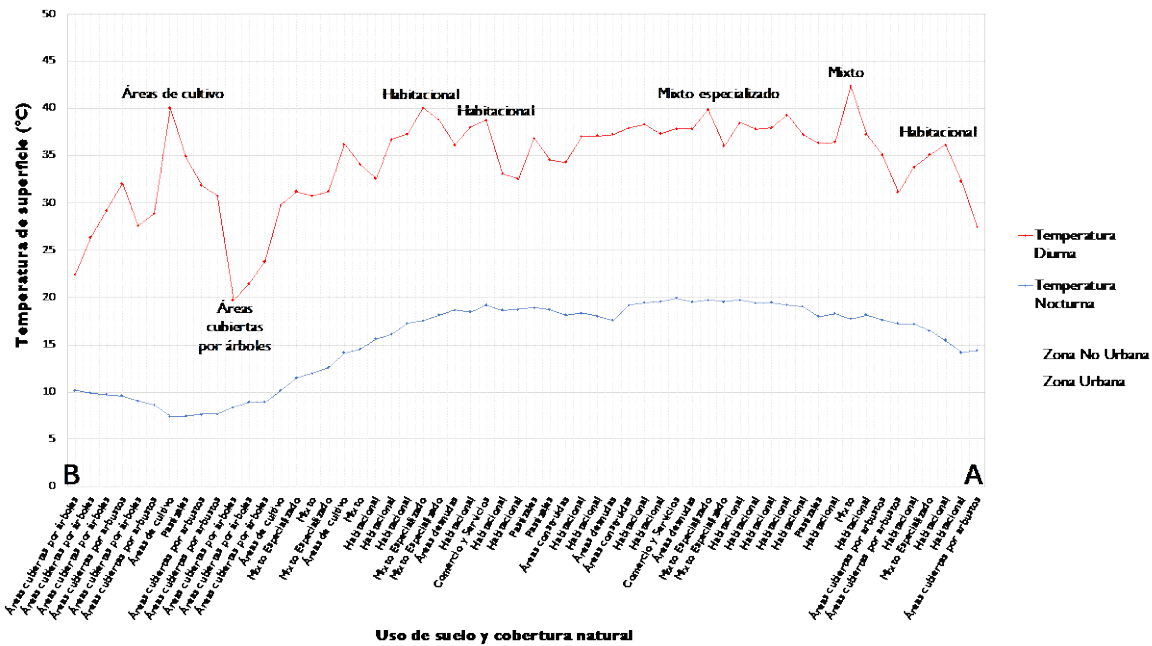


Figura 9. Perfil térmico A-B. Fuente: elaboración propia.

El perfil C-D (figura 10) presenta en general una menor variación entre las temperaturas diurnas máximas y mínimas (de 35 a 42 °C) dentro y fuera de la Ciudad, a excepción de uno de los puntos de medición (a) correspondiente a la cubierta de un centro comercial que recientemente había sido recubierta por un material termorreflejante. Esto permitió

mantener una temperatura superficial de cubierta por debajo de los 20 °C, manteniendo una diferencia de hasta 22 °C con respecto a sus alrededores. De tal manera que también durante la noche, la cubierta mantuvo casi la misma temperatura que durante el día, sino que también con su entorno.

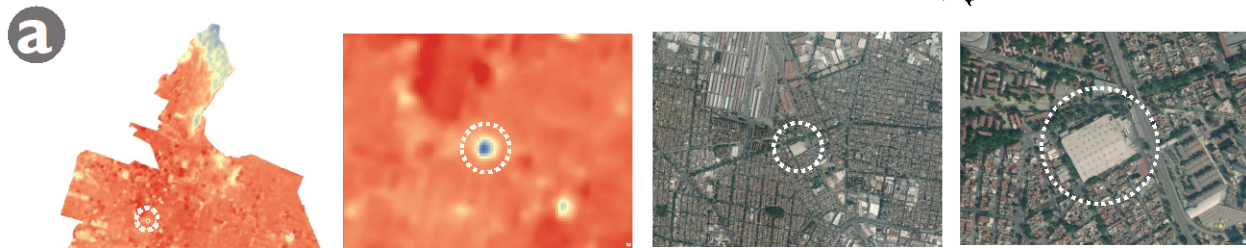
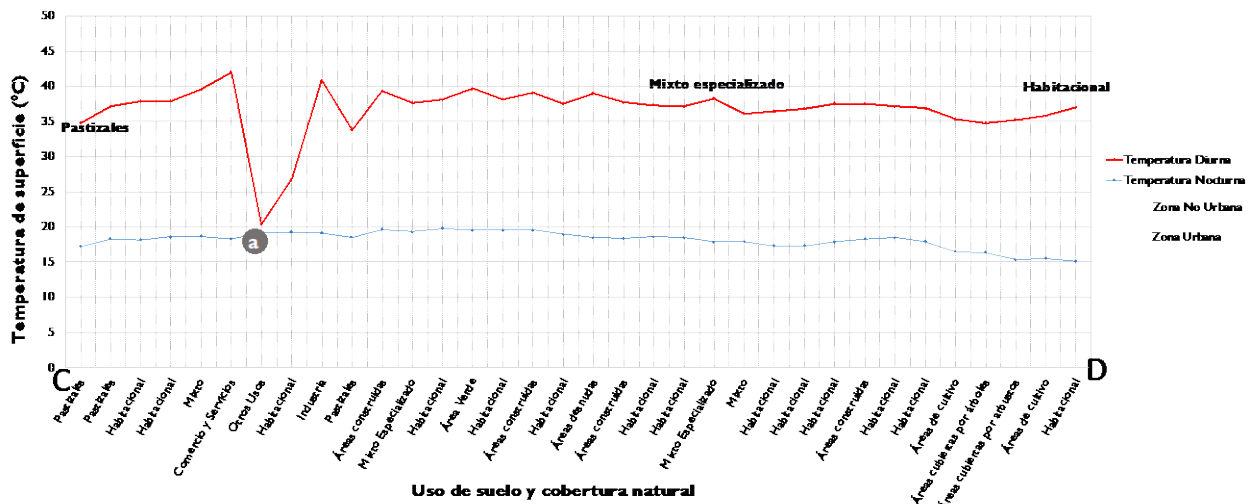


Figura 10. Perfil térmico C-D. Fuente: elaboración propia.

Finalmente, el tercer perfil E-F (figura 11) se localizó en el norte de la Ciudad, integrando al Aeropuerto Internacional Benito Juárez (b) como parte de los equipamientos e infraestructura de mayor superficie. En este sentido se puede ver que, a lo largo del perfil térmico diurno, las temperaturas máximas y mínimas oscilan entre los 31 y 45°C, siendo la zona del aeropuerto donde se concentran las temperaturas más altas.

Por el contrario, en la noche, las temperaturas bajan entre los 17 y 20 °C, localizando las temperaturas mínimas nuevamente en el aeropuerto. Esto, probablemente, debido a que la mayor superficie del equipamiento es terreno natural permitiendo disipar el calor almacenado durante el día, de manera más eficiente.

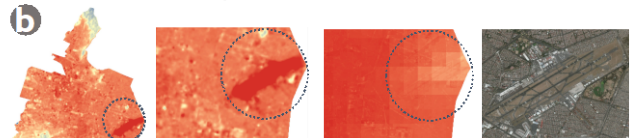
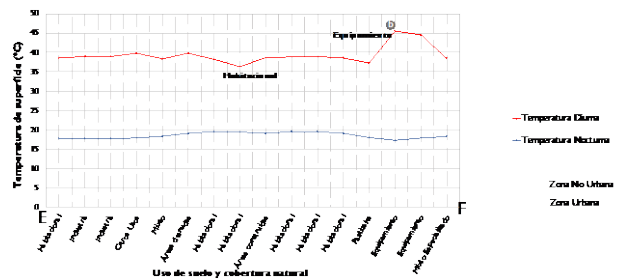


Figura 11. Perfil térmico E-F. Fuente: elaboración propia.

4. Conclusiones

El análisis de la manifestación de la Isla de Calor Urbano conforme a la estructura funcional de La Ciudad de México ha permitido identificar las relaciones socioeconómicas, de uso, cobertura,

localización, etc., de mayor vulnerabilidad debido a su relación espacial con las zonas de mayor temperatura diurna y nocturna en este territorio.

De tal manera, se identificó que las zonas donde se ha manifestado una mayor concentración del fenómeno de la Isla de Calor Urbano con temperaturas de superficie nocturnas de hasta 22 °C⁴, corresponde a gran parte del centro-norte de la ciudad (Alcaldías Cuauhtémoc, Miguel Hidalgo y Benito Juárez), siendo estas las más consolidadas, más densas, de mayor actividad económica y con mayor cantidad de población vulnerable a las altas temperaturas, es decir, aquella cuya edad oscila entre los 60 y 65 años. Por el contrario, las temperaturas más bajas se localizaron en las zonas menos consolidadas de la Ciudad por su carácter de irregularidad y dispersión con grandes áreas intermedias de cobertura natural, además de localizarse a mayor altura y a mayor distancia con respecto al centro de la Ciudad.

Contrario a lo que conceptualmente se ha planteado respecto a que la ciudad sustentable corresponde a una ciudad morfológicamente compacta y de estructura centralizada, para el caso de la Ciudad de México y específicamente en términos térmicos, se manifiesta de manera opuesta.

Con esto lo que se propone no es generar ciudades dispersas y fragmentadas, sino que, a partir de la identificación de las zonas consolidadas, densas y de mayor superficie artificializada dentro de las ciudades, se integren áreas intermedias de cobertura natural que hagan de la ciudad un conjunto de espacios más permeables que posibiliten la disipación

⁴ La temperatura del aire de confort térmico para La Ciudad de México oscila entre los 24.09 °C y los 19.09 °C de acuerdo con Auliciems.

del calor más eficientemente. Por otro lado, el empleo de materiales termorreflejantes en cubiertas industriales o de grandes comercios y usos mixtos, permitiría bajar la intensidad no sólo de la Isla de calor urbano superficial e incluso atmosférica, sino también reducir los consumos energéticos para la climatización al interior de las edificaciones con dichos materiales.

5. Reconocimiento de autoría

Itzia Gabriela Barrera Alarcón: Administración del proyecto; Metodología; análisis de datos; análisis formal; investigación; escritura-borrador original; escritura-revisión y edición. *Camilo Caudillo Cos:* Metodología; curación de datos; recursos; análisis formal. *Sandra Lizbeth Medina Ramírez:* Metodología, curación de datos; recursos. *Gerardo Felipe Ávila Jiménez:* Metodología, curación de datos; recursos. *Jorge Alberto Montejano Escamilla:* supervisión; conceptualización, ideas, revisión.

Referencias

- [1] T. R. Oke, "Towards better scientific communication in urban climate," *Theor. Appl. Climatol.*, vol. 84, no. 1-3, pp. 179-190, 2006. <https://doi.org/10.1007/s00704-005-0153-0>.
- [2] O. R. García-Cueto, E. Jáuregui-Ostos, D. Toudert, and A. Tejeda-Martinez, "Detection of the urban heat island in Mexicali, B. C., México and its relationship with land use," *Atmósfera*, vol. 20, no. 2, pp. 111-131, 2007. <http://scielo.unam.mx/pdf/atm/v20n2/v20n2a1.pdf>
- [3] J. A. Voogt and T. R. Oke, "Thermal remote

sensing of urban climates," *Remote Sens. Environ.*, vol. 86, pp. 370-384, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8).

[4] W. Zhou, G. Huang, and M. L. Cadenasso, "Does spatial configuration matter? Understanding the effects of land cover pattern on land surface temperature in urban landscapes," *Landsc. Urban Plan.*, vol. 102, no. 1, pp. 54-63, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.03.009>

[5] C. Yin, M. Yuan, Y. Lu, Y. Huang, and Y. Liu, "Effects of urban form on the urban heat island effect based on spatial regression model," *Sci. Total Environ.*, vol. 634, pp. 696-704, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.350>

[6] B. Zhou, D. Rybski, and J. P. Kropp, "The role of city size and urban form in the surface urban heat island," *Sci. Rep.*, vol. 7, no. 1, p. 4791, 2017. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04242-2>

[7] Felipe Fernández García, Fernando Allende Álvarez, Domingo Rasilla Álvarez, Alberto Martilli, and Jorge Alcaide Muñoz, *Estudio de detalle del clima urbano de Madrid*. Madrid: Ayuntamiento de Madrid, 2016. <https://www.divulgameteo.es/fotos/meteoroteca/Estudio-clima-urbano-Madrid.pdf>

[8] T. R. Oke, *Boundary Layer Climates*, 2nd ed. Taylor & Francis e-Library, 1987.

[9] M. C. Moreno-García, "Intensity and form of the urban heat island in Barcelona," *Int. J. Climatol.*, vol. 14, no. 6, pp. 705-710, 1994. <https://doi.org/10.1002/joc.3370140609>

[10] P. Lin, S. S. Y. Lau, H. Qin, and Z. Gou, "Effects of urban planning indicators on urban heat island: a case study of pocket parks in high-rise high-density environment," *Landsc. Urban Plan.*, vol. 168, pp. 48-60, Dec. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.09.024>

[11] A. J. Arnfield, "Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of

energy and water, and the urban heat island," *Int. J. Climatol.*, vol. 23, no. 1, pp. 1-26, 2003. <https://doi.org/10.1002/joc.859>

[12] T. R. Oke, "City size and the urban heat island," *Atmos. Environ.*, 1973. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(73\)90140-6](https://doi.org/10.1016/0004-6981(73)90140-6)

[13] H. Tran, D. Uchihama, S. Ochi, and Y. Yasuoka, "Assessment with satellite data of the urban heat island effects in Asian mega cities," *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, vol. 8, no. 1, pp. 34-48, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2005.05.003>

[14] M. L. Imhoff, P. Zhang, R. E. Wolfe, and L. Bounoua, "Remote Sensing of Environment Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA," *Remote Sens. Environ.*, vol. 114, no. 3, pp. 504-513, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.10.008>

[15] S. Peng et al., "Surface urban heat island across 419 global big cities," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 46, no. 2, pp. 696-703, Jan. 2012. <https://doi.org/10.1021/es2030438>

[16] K. W. Oleson, G. B. Bonan, and J. Feddema, "Effects of white roofs on urban temperature in a global climate model," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 37, no. 3, 2010. <https://doi.org/10.1029/2009GL042194>

[17] J. Peng, Y. Hu, J. Dong, Q. Liu, and Y. Liu, "Quantifying spatial morphology and connectivity of urban heat islands in a megacity: A radius approach," *Sci. Total Environ.*, vol. 714, p. 136792, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136792>

[18] L. W. A. van Hove, C. M. J. Jacobs, B. G. Heusinkveld, J. A. Elbers, B. L. van Driel, and A. A. M. Holtslag, "Temporal and spatial variability of urban heat island and thermal comfort within the Rotterdam agglomeration," *Build. Environ.*, vol. 83, pp. 91-103, Jan. 2015.

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.08.029>

[19] L. Barradas, J. Cervantes, and G. Balderas, "UHI analysis in Puebla , Mexico , a high altitud tropical city." 2012. https://www.researchgate.net/publication/270050127_UHI_analysis_in_Puebla_Mexico_a_high_altitude_tropical_city

[20] I. Barrera, "Metodología de evaluación de la sostenibilidad urbana a partir del análisis de las características climáticas y del medio físico construido.," Universitat Politècnica de Catalunya, 2018. 10.13140/RG.2.2.32151.44961

[21] V. Barrandas, "La isla de calor urbana y la vegetación arbórea," *Oikos*, vol. 7, pp. 16-19, 2013.

https://www.researchgate.net/publication/265905412_La_isla_de_calor_urbana_y_la_vegetacion_arborea

[22] A. S. Díaz and E. P. Ruiz, "Uso De Percepcion Remota Y Sistemas De Informacion Geografica Para La Determinacion De Islas De Calor Urbano En Ciudad Juarez , Chihuahua," Memorias de resúmenes en extenso SELPER-XXI-México-UACJ-2015. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Ciudad Juárez, Chihuahua, México, 2015. <https://1library.co/document/zgwm113n-percepcion-remota-sistemas-informacion-geografica-determinacion-urbano-chihuahua.html>

[23] M. Méndez, C. Constantino, M. Uribe, G. Becerril, and L. Alejandra, "Isla de calor en Toluca, Méxicio," *Cienc. ergo sum*, vol. 14-3, pp. 307-316, 2007. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10414308>

[24] M. B. Oseguera and V. L. Barradas, "The Actual Urban Heat Island in Mexico City," 8th International Conference on Urban Climate, vol. W5.222, no. August. pp. 10-11, 2012. 10.13140/2.1.3669.4081

[25] J. Villanueva-Solis, A. Ranfla, and A. Quintanilla-Montoya, "Isla de Calor Urbana:

Modelación Dinámica y Evacuación de medidas de Mitigación en Ciudades de Clima Árido Extremo," *SciELO*, 2017. doi: 10.4067/S0718-07642013000100003

[26] L. Mercado and I. Marincic, "Morfología de Isla de Calor urbana en Hermosillo, Sonora y su aporte hacia una ciudad sustentable.," *Biotecnia*, vol. XIX, pp. 26-33, 2017. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v19i0.407>

[27] J. Navarro-Estupiñan, A. Robles-Morua, R. Díaz-Caravantes, and E. R. Vivoni, "Heat risk mapping through spatial analysis of remotely-sensed data and socioeconomic vulnerability in Hermosillo, México," *Urban Clim.*, vol. 31, Mar. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100576>

[28] INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, "México en cifras," 2020. [Online]. Available: <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=09#collapse-Resumen>.

[29] CentroGeo, "Plataforma de Información Geoespacial," 2022. [Online]. Available: <https://idegeo.centrogeo.org.mx>.

[30] INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, "Aspectos Geográficos. CDMX," 2018.

[31] M. Stathopoulou and C. Cartalis, "Downscaling AVHRR land surface temperatures for improved surface urban heat island intensity estimation," *Remote Sens. Environ.*, vol. 113, no. 12, pp. 2592-2605, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.07.017>

[32] Q. Weng, P. Fu, and F. Gao, "Generating daily land surface temperature at Landsat resolution by fusing Landsat and MODIS data," *Remote Sens. Environ.*, vol. 145, pp. 55-67, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.003>

[33] A. Karnieli, M. Bayasgalan, Y. Bayarjargal, N. Agam, S. Khudulmur, and C. J. Tucker,

Revista de Ciencias Tecnológicas (RECIT). Volumen 5 (3): 312-330.

"Comments on the use of the Vegetation Health Index over Mongolia," *Int. J. Remote Sens.*, vol. 27, no. 10, pp. 2017-2024, 2006.
<https://doi.org/10.1080/01431160500121727>

[34] USGS, "United States Geological Survey," 2020. [Online]. Available: <https://www.usgs.gov>.

[35] N. Agam, W. P. Kustas, M. C. Anderson, F. Li, and C. M. U. Neale, "A vegetation index based technique for spatial sharpening of thermal imagery," *Remote Sens. Environ.*, vol. 107, no. 4, pp. 545-558, 2007.

<https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.10.006>

[36] J. Montejano et al., "Urban form and productivity in México 1995-2015," *Eur. J. Sustain. Dev.*, vol. 9, no. 1, pp. 300-316, 2020.
<https://doi.org/10.14207/ejsd.2020.v9n1p300>

Derechos de Autor (c) 2022 Itzia Gabriela Barrera Alarcón, Camilo Alberto Caudillo Cos, Sandra Lizbeth Medina Fernández, Felipe Gerardo Ávila Jiménez, Jorge Alberto Montejano Escamilla



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Usted es libre para compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia](#) - [Texto completo de la licencia](#)