

CAPÍTULO 13

CARACTERÍSTICAS ÓPTICAS Y PIEZOELÉCTRICAS EN UÑAS DE PERSONAS DIABÉTICAS

Data de submissão: 25/11/2024

Data de aceite: 05/02/2025

Margarita Galindo Mentle

Dra. Universidad Tecnológica de Xicotepec de Juárez, Ingeniería en Mantenimiento Industrial, Cd. Xicotepec de Juárez, Puebla-México
ORC ID: 0000-0001-5390-5960

Luis Ángel Blas Sánchez

Dr. Universidad Tecnológica de Xicotepec de Juárez, Ingeniería en Mantenimiento Industrial, Cd. Xicotepec de Juárez, Puebla-México
ORC ID: 0000-0003-3313-8551

RESUMEN: La piezoelectricidad en uñas humanas es un fenómeno interesante relacionado con las propiedades mecánicas y eléctricas de la queratina, el principal componente estructural de las uñas. Aunque la piezoelectricidad en materiales biológicos como huesos, tendones y piel es bien conocida, la investigación sobre este efecto en uñas es más limitada. La queratina, una proteína altamente ordenada, posee una estructura helicoidal que podría generar piezoelectricidad bajo deformación mecánica. Las muestras de uñas fueron sometidas a una fuerza mecánica, la cual provocó un potencial

eléctrico en la superficie de la muestra de 48mV_{pp} . La piezoelectricidad en tejidos biológicos depende de la organización estructural y la densidad de las proteínas. En las imágenes de AFM, se observa la presencia de estructuras agrupadas de microfibrillas de queratina, la compactación de las estructuras fibrosas no es uniforme, y la imagen parece tener irregularidades en la superficie, lo que podría ser indicativo de cambios estructurales en la queratina. En la sangre, los cambios en la estructura proteica afectan el espectro de absorción, como en el caso del pico de 415 nm (pico de Soret) de la hemoglobina glicada. Si el grado de glicación está correlacionado con los cambios estructurales de proteínas como la queratina en uñas, podría establecerse una relación entre el espectro UV-Vis de la sangre y la piezoelectricidad en las uñas.

PALABRAS CLAVE: UV-Vis, piezoelectricidad, AFM, queratina, uñas, diabetes.

ABSTRACT: Diabetes mellitus is one of the most serious public health problems facing Mexico. The most concerning factor is the lack of control over the disease, which directly causes severe damage to the patient's health and quality of life.

Piezoelectricity in human nails is an interesting phenomenon related to the mechanical and electrical properties of keratin, the main structural component of nails. While piezoelectricity in biological materials such as bones, tendons, and skin is well known, research on this effect in nails is more limited. Keratin, a highly ordered protein, has a helical structure that may generate piezoelectricity under mechanical deformation. Nail samples were subjected to mechanical force, which caused an electrical potential of 48 mVpp on the sample's surface. Piezoelectricity in biological tissues depends on the structural organization and density of the proteins. In AFM images, the presence of clustered keratin microfibril structures can be observed. The compaction of the fibrous structures is not uniform, and the image shows surface irregularities, which could indicate structural changes in the keratin. In blood, changes in protein structure affect the absorption spectrum, as seen in the 415 nm peak (Soret peak) of glycated hemoglobin. If the degree of glycation correlates with structural changes in proteins like keratin in nails, a relationship between the UV-Vis spectrum of blood and the piezoelectricity in nails could potentially be established.

KEYWORDS: UV-Vis, piezoelectricity , AFM,nails, keratin, Diabetes.

INTRODUCCIÓN

Otro fenómeno importante presente en materiales no-centrosimétricos es la piezoelectricidad. Los materiales piezoeléctricos son una clase de materiales que pueden acumular carga eléctrica en respuesta a una fuerza mecánica aplicada, facilitando la conversión de energía mecánica a energía eléctrica y viceversa. En algunos sistemas biológicos como las proteínas están formadas de 20 aminoácidos conocidos, la mayoría son estructuras cristalinas no-centrosimétricas y por lo tanto, presentan piezoelectricidad [1-3]. Gran parte del trabajo original sobre el descubrimiento de la piezoelectricidad en el cuerpo fue realizado por Eiichi Fukada [4]. Su trabajo mostró la presencia de piezoelectricidad en hueso, músculos y tendones [5-7].

Numerosas enfermedades, como la diabetes, la malaria, la anemia falciforme e incluso determinados tipos de cáncer, alteran las propiedades ópticas, eléctricas, bioquímicas y piezoeléctricas del cuerpo[8,9].. Por ejemplo, alteraciones en la composición de la sangre, morfología en huesos o uñas, etc. La detección a tiempo de las alteraciones en el cuerpo es de suma importancia para la detección de enfermedades. Muchos estudios adicionales han contribuido al conocimiento general de las características piezoeléctricas del cuerpo, sus orígenes y cómo se pueden aplicar en la ciencia médica.

METODOLOGÍA

La espectrofotometría es uno de los métodos de análisis más usados, y se basa en la relación que existe entre la absorción de luz por parte de un compuesto y su concentración. Cuando se hace incidir luz monocromática (de una sola longitud de onda) sobre un medio homogéneo, una parte de la luz incidente es absorbida por el medio y otra

transmitida, como consecuencia de la intensidad del rayo de luz sea atenuada desde P_0 a P , siendo P_0 la intensidad de la luz incidente y P la intensidad del rayo de luz transmitido. Cada sustancia tiene su propio espectro de absorción, el cual es una curva que muestra la cantidad de energía radiante absorbida[10,11]. Ley de Lambert, establece que cuando pasa luz monocromática por un medio homogéneo, la disminución de la intensidad del haz de luz incidente es proporciona al espesor del medio, lo que equivale a decir que la intensidad de la luz transmitida disminuye exponencialmente al aumentar aritméticamente el espesor del medio absorbente (Figura 1).

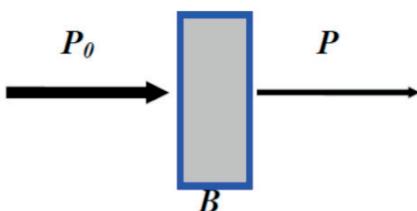


Figura 1. Ley de Lambert

La Ley de Lambert-Beer, es una relación matemática que describe cómo la absorción de luz se relaciona con las propiedades del material que atraviesa. Es fundamental en la espectroscopía y es utilizada para analizar la concentración de compuestos en soluciones.

La expresión matemática de la Ley de Lambert-Beer se expresa de la siguiente forma:

$$A = \varepsilon \cdot b \cdot C$$

Donde A es la absorbancia (adimensional), que es la medida de cuánta luz es absorbida por la muestra, ε es la absorbividad molar o coeficiente de extinción molar (en $\text{L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$), que es una constante que indica cuán fuertemente un soluto absorbe luz a una longitud de onda específica, b es la longitud del trayecto óptico (en cm), que es la distancia que recorre la luz a través de la muestra (generalmente la anchura de la celda donde se contiene la muestra) y C es la concentración de la muestra (en mol/L) [12,13].

La Absorbancia (A) es una medida directa de la cantidad de luz que una solución absorbe. La absorbancia no tiene unidades y se calcula usando la relación:

$$A = \frac{\log P_0}{P} = -\log T$$

donde P_0 es la intensidad inicial de la luz incidente (antes de pasar por la muestra) y P es la intensidad de la luz después de atravesar la muestra. La concentración de la solución $P_0/P = T$, Transmitancia.

La lámina ungueal o uña es una estructura dérmica que recubre la parte superior

de los dedos de las manos y los pies. Está compuesta principalmente de queratina, una proteína fibrosa y tiene varias funciones importantes, como proteger las terminaciones nerviosas de los dedos, facilitar la manipulación de objetos. Tiene tres capas horizontales, la lámina dorsal delgada es la capa más delgada situada en la parte superior de la uña, está formada por queratina. Lámina intermedia, se encuentra debajo de la lámina dorsal, en la zona interna de la uña se concentran la mayoría de las células queratinosas que proporcionan la estructura y dureza a la uña. La capa ventral o capa dérmica, se encuentra en contacto con el lecho ungueal, que es un área vascularizada de piel que suministra nutrientes y oxígeno a la uña en crecimiento. Su tasa de crecimiento promedio de 3-4 mm por mes en las manos y 1-2 mm por mes en los pies.

Las uñas sanas tienen un color blanco translúcido en el borde libre y un color rosado en la parte visible debido al flujo sanguíneo bajo la lámina ungueal [15].

La uña está compuesta sobre todo por proteínas en un 90-95%, los aminoácidos son esenciales para la síntesis de queratina. Los aminoácidos más importantes en la composición de las uñas son la cisteína, metionina, arginina, glutamina y prolina. Las uñas también contienen lípidos (grasas) menor a 1%, principalmente en las membranas celulares que componen el lecho ungueal y las capas más internas de la uña. Los lípidos ayudan a mantener la hidratación y la flexibilidad de la uña. Pequeñas cantidades de ácidos nucleicos (ADN y ARN) son cruciales para la síntesis de queratina y otros componentes de la uña durante su crecimiento[16-17]. El color de las uñas depende de la melanina que es el pigmento que da color a la piel, el cabello y las uñas. Las uñas tienen agua entre un 10-18% y con una pequeña fracción de minerales (sodio, magnesio, zinc, fósforo, cobre, hierro y calcio) entre un 1-2%. Las alteraciones en cualquiera de estos componentes pueden afectar la apariencia y la salud de las uñas.

Por ejemplo, un color amarillento en las uñas puede estar asociadas con enfermedades como diabetes o infecciones fúngicas; uñas azules pueden indicar falta de oxígeno (cianosis); y uñas pálidas pueden estar relacionadas con anemia o problemas circulatorios. Líneas horizontales o puntos blancos en las uñas pueden ser indicativos de deficiencias nutricionales, trauma o enfermedades sistémicas [18-20]. La curvatura excesiva puede estar asociada con hipoxia o enfermedades pulmonares. Las uñas pueden arrojar algunas pistas de enfermedades, pero se requiere pruebas de laboratorio para su certeza. Sin embargo, los métodos de análisis de las uñas en combinación con otras herramientas podrían convertirse en un enfoque complementario para la detección temprana y el monitoreo de enfermedades crónicas. La espectroscopía UV-vis podría usarse para estudiar las características moleculares de las uñas. Las alteraciones en los picos espectrales podrían correlacionarse con el metabolismo alterado en personas diabéticas, especialmente los cambios en las proteínas o en la glucosa en el cuerpo.

RESULTADOS

El análisis morfológico de AFM que has proporcionado para determinar características que puedan estar relacionadas con una uña de una persona diabética. El microscopio de fuerza atómica (AFM) es un tipo de microscopio de sonda de barrido que se puede utilizar para obtener imágenes de topografías de tamaño micrométrico a nanométrico. Las muestras de uñas fueron cortas, desinfectadas en alcohol etílico y posteriormente pulidas. En la Figura 2a, se muestra la imagen de la uña de una persona diabética, su color no es uniforme, presenta una líneas o áreas ligeramente con un color más claro que otros. La Figura 2b se obtuvo usando AFM, en la imagen se observa la presencia de estructuras que parecen tener forma circular o anular, lo que sugiere la presencia de células o estructuras fibrosas agrupadas de microfibrillas de queratina. Hay un patrón de estiramiento horizontal, que podría ser un efecto del escaneo AFM o de la muestra misma. La compactación de las estructuras fibrosas no es uniforme, y la imagen parece tener irregularidades en la superficie, lo que podría ser indicativo de cambios estructurales en la queratina.

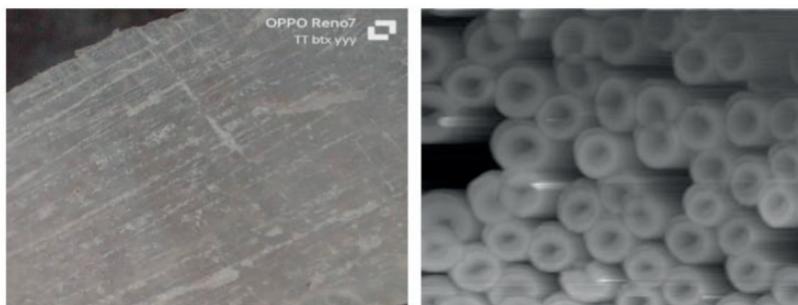


Figura 2. a) Muestra de uña de persona diabética, la muestra fue desafejada y pulida. b) imagen de la morfología de la uña usando AFM, presencia de células o estructuras fibrosas agrupadas de microfibrillas de queratina.

En personas con diabetes, las uñas pueden mostrar cambios en la estructura y en la morfología debido a alteraciones metabólicas y glicación avanzada. Esto podría afectar la forma y distribución de las fibras de queratina. Las áreas más claras y más oscuras podrían estar reflejando diferencias en la rugosidad superficial, que pueden estar asociadas con daños estructurales.

La piezoelectricidad es un fenómeno que se presenta en materiales no-centrosimétricos, tales como los sistemas biológicos (orgánicos) proteínas biopolímeros, polisacáridos, y glándulas [5, 6]. Las proteínas están formadas de 20 aminoácidos conocidos, la mayoría son estructuras cristalinas no-centrosimétricas, y, por lo tanto, pueden presentar piezoelectricidad.

La figura 3, se muestra la respuesta de la uña al aplicar una fuerza de impacto, usando la caída libre de una masa de 14 g a una altura de 10 cm la respuesta es detectada

usando un osciloscopio tektronix conectado en las caras de la uña. La diferencia de potencial producido en la muestra es de 48.8 mVpp, el cual ha sido amplificado 10 veces.



Figura 3. Medición de potencial eléctrico generado por la aplicación de fuerza sobre la muestra de uña de persona diabética.

Cuando una fuerza externa es aplicada, ocurre una deformación en la estructura de la queratina. La deformación provoca una reorientación de los dipolos eléctricos en las moléculas de queratina, lo que genera una diferencia de potencial eléctrico. El potencial eléctrico generado en la muestra, prueba que en las uñas presentan la propiedad de piezoelectrica. Sin embargo, su potencial eléctrico no es constante por lo que varía de una prueba a otra.

La microscopía UV-Vis es una técnica poderosa para analizar la composición química de materiales, especialmente aquellos con características ópticas significativas. Es ampliamente utilizada en la biología, química, investigación de materiales, y conservación del arte, debido a su capacidad para proporcionar información tanto estructural como composicional de forma no destructiva. En la figura 4, se muestran películas de muestras de sangre tomadas en ayunas en personas sanas y diabéticas, todos pertenecientes a una familia. Las muestras se usaron para realizar un estudio de absorción con el equipo de UV-vis 300 en un rango de 300 a 900nm.



Figura 4. Muestras de sangre de personas sanas y con diabetes.

En la figura 5, se muestra el espectro de absorción en el rango ultravioleta-visible (UV-Vis) de muestras de sangre, donde se comparan las características de absorción entre personas sanas (muestras M.S.M, M.S.D) y una persona diabética (muestra M.D.C), un rango de 300 a 900 nm. El espectro de absorción de color azul, correspondiente a una persona diabética y los gráficos rojo y negro de personas sanas.

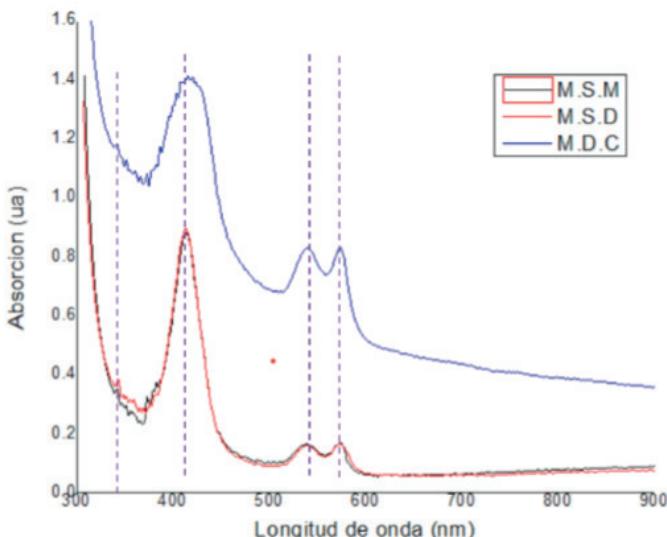


Figura 5. El espectro de absorción de color rojo y negro corresponden a personas sanas (muestras M.S.M y M.S.D) y el gráfico de color azul correspondiente a una persona diabética (muestra M.D.C).

Se observa un pico alrededor de ~ 415 nm, conocido como pico de Soret. El estrés oxidativo en diabéticos genera productos como los malondialdehídos (MDA), que reaccionan con tiobarbiturato para formar compuestos absorbentes entre ~ 532 nm.

Los Picos de Absorción en la muestra M.D.C, muestra mayor absorción en la región UV (300 - 500 nm) y presenta picos más definidos en comparación con las muestras de personas sanas. La Glucosa no absorbe directamente en el rango UV-Vis, pero puede analizarse indirectamente mediante reacciones enzimáticas (como con glucosa oxidasa), generando productos cromogénicos que absorben en el rango visible (~ 450 -500 nm). Las Proteínas glicadas como la HbA1c, es indicador del control glicémico a largo plazo, puede alterar el perfil de absorción de la hemoglobina. En las muestras de personas sanas y diabéticas se observa un pico alrededor de ~ 415 nm, conocido como pico de Soret. La presencia de HbA1c altera la absorción en el pico de Soret. Aunque la posición del pico se mantiene, la glicación genera una variación en la amplitud y forma del pico ocasionado por proteínas glicadas y no glicadas. Hay un segundo conjunto de picos visibles entre 500 y 600 nm, que son característicos en la muestra diabética, pero menos pronunciados en las muestras sanas. El estrés oxidativo en diabéticos genera productos como los malondialdehídos (MDA), que reaccionan con tiobarbiturato para formar compuestos absorbentes entre ~ 532 nm.

CONCLUSIÓN

La diabetes mellitus es uno de los problemas más graves de salud pública que enfrenta México. El factor más preocupante es la falta de control de la misma, lo que incide de manera directa, causando daños severos a la salud. Es una enfermedad prolongada (crónica) en la cual el cuerpo no puede regular la cantidad de azúcar en la sangre y con el paso del tiempo tiende a degenerar los sistemas de cuerpo. La relación entre la piezoelectricidad en uñas y el espectro UV-Vis de sangre en diabéticos se fundamenta en los cambios inducidos por la glicación y el estrés oxidativo en las proteínas. Ambos fenómenos reflejan alteraciones en la organización molecular y propiedades biofísicas de los tejidos afectados por la diabetes. Establecer esta conexión podría abrir nuevas posibilidades para desarrollar métodos de diagnóstico no invasivos.

REFERENCIAS

1. C. Kittel, *Introduction to solid state physics*, 6th Ed., Wiley, New York, 1986.
2. E. Marsh, *Centrosymmetric or noncentrosymmetry*. *Acta Cryst. B* 42 (1986) 193-198.
3. Shamos M. and Lavine L. (1967) Piezoelectricity as a fundamental property of biological tissues. *Nature* 213, 267-269.
4. Marino A. A. (1988) Direct current and bone growth. In: *Modern Bioelectricity* (Edited by Marino A.), pp. 656-710, Marcel Dekker. New York.
5. Baran R, Dawber PRP, de Berker DAR. Science of the nail apparatus. In: Baran R, Dawber PRP, de Berker, Hancke E, Tosti A, editors. *Baran and Dawber's diseases of the nails and their management*. London: Blackwell Science 2001:1-47.
6. Webpagefx. (2020). Piezo ceramic medical tools & piezoelectric devices.
7. Fukada E, Hara K. Piezoelectric effect in blood vessel walls. *Journal of the Physical Society of Japan*. 1969;26(3):777-780
8. T. Kobayashi , S. Nakamura , K. Yamashita , *J. Biomed. Madre. Res.* 2001 , 57 , 477.
9. T. Hiratsuka , M. Uezono , K. Takakuda , M. Kikuchi , S. Oshima , T. Sato , S. Suzuki , K. Moriyama , *J Biomed. Madre. Res., Parte B* 2019 , 108 , 391
10. Kausik Kapat, Quazi TH Shubhra, Miao Zhou* y Sander Leeuwenburgh; Nanobiomateriales piezoelectrinos para biomedicina y regeneración de tejidos, *Advanced Functional Materials* Volume 30, 2020.
11. Mark, H. *Principles and Practice of Spectroscopic Calibration, Chemical Analysis*, Vol. 118, Wiley: New York, 1991

12. Validation of Compendial Methods, United States Pharmacopoeia XXII, National jormulary, XVII, The United States Pharmacopoeial Convention, Inc., Rockville, MD. 1710–1712, 1990.
13. Standards in Absorption Spectrometry, Techniques in Visible and Ultraviolet spectrometry: Volume 1; Burgess, C.; Knowles, A., Eds.; Chapman & Hall: London,1981.
14. Nowicka-Jankowska, T.; Gorczynska, A.; Michalik, A.; Wieteska, E. Comprehensive Analytical Chemistry, Volume XIX, Analytical Visible and Ultraviolet Spectrometry; Elsevier: Amsterdam, 1986.
15. Operational Qualification and Performance Verification of UV-Visible Spectrophotometers, Agilent Technologies, publication number 5965-7438E, 2000.
16. Silva C., Thomazini D. et al. (2001) Películas de colágeno-hidroxiapatita: películas piezoelectricas. Mat. Sci. Eng. 863: 210–218.
17. Baran R, Dawber PRP, de Berker DAR. Science of the nail apparatus. In: Baran R, Dawber PRP, de Berker, Haneke E, Tosti A, editors. Baran and Dawber's diseases of the nails and their management. London: Blackwell Science 2001:1-47.
18. Haneke E. Surgical anatomy of the nail apparatus. Dermatol Clin 2006;26:291–296.
19. Paus R, Peker S, Sundberg JP. Biology of hair and nails. In: Bolognia JL, Jorizo JL, Rapini RP, editors. Dermatology, 2nd ed. Vol. 1. Amsterdam: Elsevier, 2009:965.
20. A. Repka, John O'Haver, Chun Hwa Ver, Kavitha Gutta, Manish Munjal. Estudios de morfología ungual como evaluación para modalidades de tratamiento de onicomicosis. Volume 245, Elsevier, 2002.