

Sección: Hot Science

Los bloques moleculares de los alimentos: De átomos invisibles a texturas irresistibles

The molecular building blocks of food: From invisible atoms to irresistible textures

Juan Pablo Carreón-Hidalgo*

Facultad de Ingeniería Química, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México.

*Autor para la correspondencia: jpch_26@outlook.com

RESUMEN

Las propiedades emergentes describen cómo las características de un material surgen de la organización y comportamiento colectivo de sus elementos más simples. Los alimentos son sistemas complejos estructurados desde una escala nanométrica, cuyas interacciones moleculares entre sus componentes determinan sus propiedades físicas, sensoriales e incluso nutricionales. Comprender el concepto de emergencia aplicado a alimentos ayudará a pasar desde la formulación empírica hacia un diseño racional de alimentos funcionales y alternativas alimentarias para el siglo XXI.

Palabras clave: Propiedad emergente, materia blanda, microestructura de alimentos.

SUMMARY

Emergent properties describe how the characteristics of a material arise from the organization and collective behavior of its simplest elements. Foods are complex systems structured at the nanoscale, whose physical, sensory, and even nutritional properties are determined by the molecular interactions among their components. Understanding the concept of emergence as it applies to foods will help us move from empirical formulation toward a rational design of functional foods and food alternatives for the 21st century.

Keywords: Emergent properties, soft matter, food microstructure.

De las moléculas al paladar y del paladar al estómago

Pensemos en un acto tan cotidiano como comer. Ya sea en el desayuno o una botana de fin de semana, al sentir atributos como el sabor, la cremosidad o la crocancia (si el alimento es crujiente) resulta importante considerar que estas características no se originan a partir de un solo ingrediente; se trata de respuestas complejas que “emergen” de los componentes y organización microscópica del alimento una vez que interactúan con nuestros sentidos. Por ejemplo, lo que conocemos como textura se trata de un fenómeno muy dinámico, ya que un alimento no tiene una sola textura, sino una secuencia de estados que surgen a medida que los dientes deforman la estructura, la saliva la lubrica y las enzimas digestivas la degradan en la boca. El tacto en la lengua es tan sensible que nos permite percibir la rugosidad de cualquier partícula individual mayor a 3 micrómetros (μm), pero si mediante el procesamiento industrial logramos reducir agregados de proteínas o gotas de grasa a un tamaño microscópico de entre 0.1 y 3 μm las partículas dejan de percibirse como granos individuales y comienzan a rodar unas sobre otras bajo nuestros dientes. Este “efecto de rodamiento” hace emerger una fluidez sedosa que denominamos cremosidad [1].

El hecho de que la composición y microestructura de un alimento determine las propiedades que percibimos o que podemos medir (como la viscosidad o vida de anaquel, por ejemplo) también tiene implicaciones importantes a nivel nutricional, ya que las microestructuras físicas de las que forman parte los nutrientes de un alimento condicionan su bioaccesibilidad y su biodisponibilidad. Podemos pensar en la bioaccesibilidad como en la facilidad con la que un nutriente se libera de su “prisión” dentro de la microestructura del alimento, mientras que la biodisponibilidad es la porción de dicho nutriente que, una vez liberada, se absorbe y aprovecha por el orga-

nismo. Un ejemplo de esto es el que se da en proteínas de la leche: las micelas de caseína y las proteínas del suero. Las micelas de caseína son paquetes microscópicos de proteínas y calcio que flotan uniformemente en la leche sin precipitar ni separarse. Bajo el pH ácido del estómago, estos paquetes coagulan rápidamente en una red densa que reduce su digestibilidad, comportándose como una proteína de liberación lenta que abastece de aminoácidos al organismo de forma lenta y prolongada. En cambio, las proteínas del suero permanecen solubles y pasan rápidamente al intestino, funcionando como una proteína de liberación rápida que aumenta de manera efímera la concentración de aminoácidos en la sangre. Es por esto que la respuesta metabólica de nuestro cuerpo no solo depende de qué nutrientes ingerimos, sino de la estructura física en la que la matriz del alimento los mantiene atrapados [2].

¿Qué son las propiedades emergentes y como influyen sobre lo que podemos medir o digerir?

Las propiedades mencionadas anteriormente se pueden considerar o entender como características que “emergen” a partir de interacciones moleculares débiles o simples a escalas nano o micrométricas. El término de “propiedad emergente” se refiere a propiedades que surgen en sistemas complejos a partir de sus elementos más simples [3]. Como ejemplo geométrico básico, podemos pensar en una gran cantidad de puntos que al unirse forman una línea recta, líneas que definen superficies bidimensionales y superficies que generan cuerpos tridimensionales. En cada nivel de complejidad “emergen” propiedades que no están presentes en niveles inferiores: no tiene sentido hablar de ángulos en un solo punto, ni de volumen en una superficie plana [3].

En la química, y muchas otras áreas de la ciencia, ocurre algo similar. Propiedades como

la densidad, la transparencia, el color o la temperatura no existen a nivel molecular. Por ejemplo, una sola molécula de agua no es transparente, ni azul, ni tiene una densidad o temperatura que podamos medir de forma aislada. Al medir la temperatura de un fluido, obtenemos un reflejo de la energía cinética promedio de todas las moléculas. De esta forma el concepto de emergencia nos ayuda a establecer un nuevo nivel de explicación al permitirnos medir y explicar las características de un material específico a escala macroscópica sin la enorme tarea de calcular o predecir la trayectoria de billones de partículas individuales [3, 4]. Si quisiéramos predecir las propiedades de un compuesto orgánico, por ejemplo, a partir del estudio aislado de sus componentes básicos resultaría en una tarea muy difícil, ya que la combinación de átomos de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno permite obtener una diversidad casi infinita de compuestos con propiedades imposibles de deducir analizando sus átomos por separado [3]. Sumado a lo anterior, se ha demostrado en el laboratorio que la emergencia se manifiesta de forma gradual o a través de arreglos con un número mínimo de moléculas. Por ejemplo, una sola molécula de agua no se encuentra en estado líquido ni sólido. A la temperatura adecuada se requiere reunir gradualmente un conjunto de unas 20 moléculas para que comiencen a comportarse como un líquido y entre 275 y 475 para que emerja una red cristalina de hielo [4].

A nivel biológico, un ejemplo es el del almidón y la celulosa (Figura 1). Estos compuestos, formados únicamente por glucosas unidas en grandes estructuras similares a una cadena,

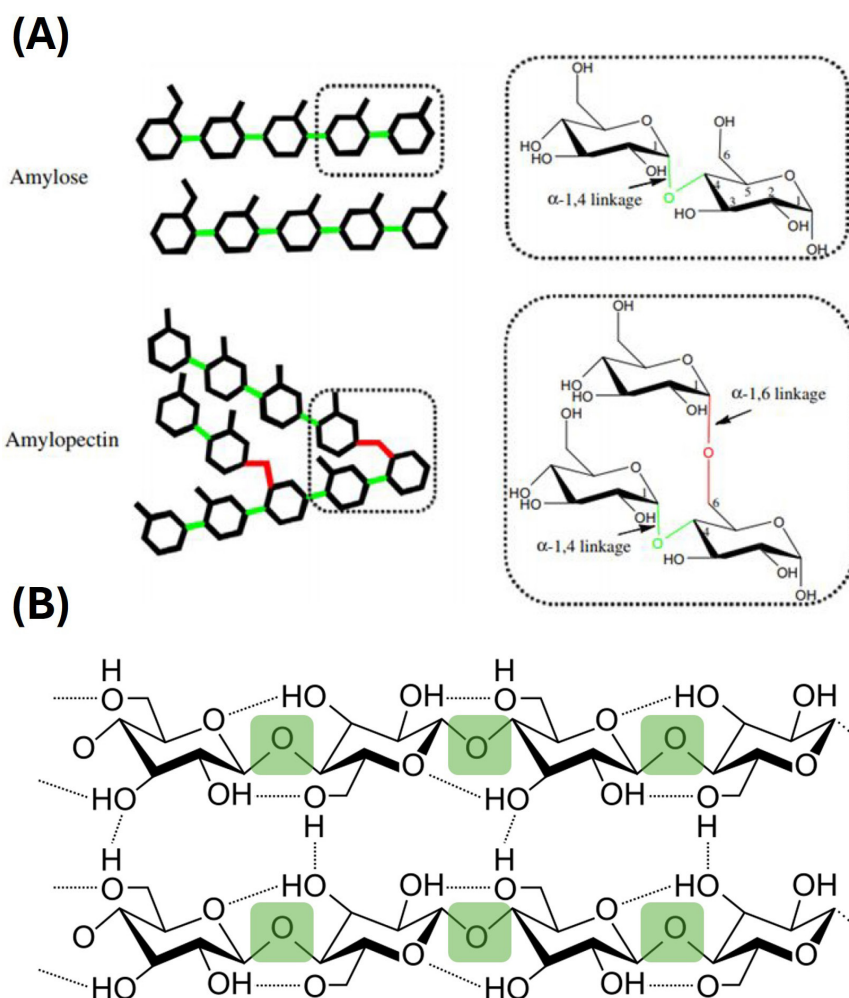


Figura 1. Comparación estructural entre polisacáridos digeribles y no digeribles (estructurales). (A) Representación de la amilosa y amilopectina detallando los enlaces glucosídicos alfa (α)-1,4 y α -1,6. (B) Disposición molecular de la celulosa señalando los enlaces glucosídicos beta (β)-1,4 en los recuadros verdes y los puentes de hidrógeno con líneas punteadas. Ambas figuras son de uso libre bajo licencia Creative Commons (CC BY-SA 4.0).

ilustran claramente cómo pequeños cambios en la arquitectura molecular y el empaquetamiento generan propiedades completamente opuestas. El almidón es un carbohidrato complejo y digerible que se incluye en muchos tipos de alimentos y que, de forma natural en granos y semillas presenta una estructura que va desde la escala nanométrica hasta el gránulo visible. Los gránulos de almidón están conformados por dos fracciones de distinta apariencia, amilosa y amilopectina, cuya estructura molecular se sustenta en enlaces de tipo alfa

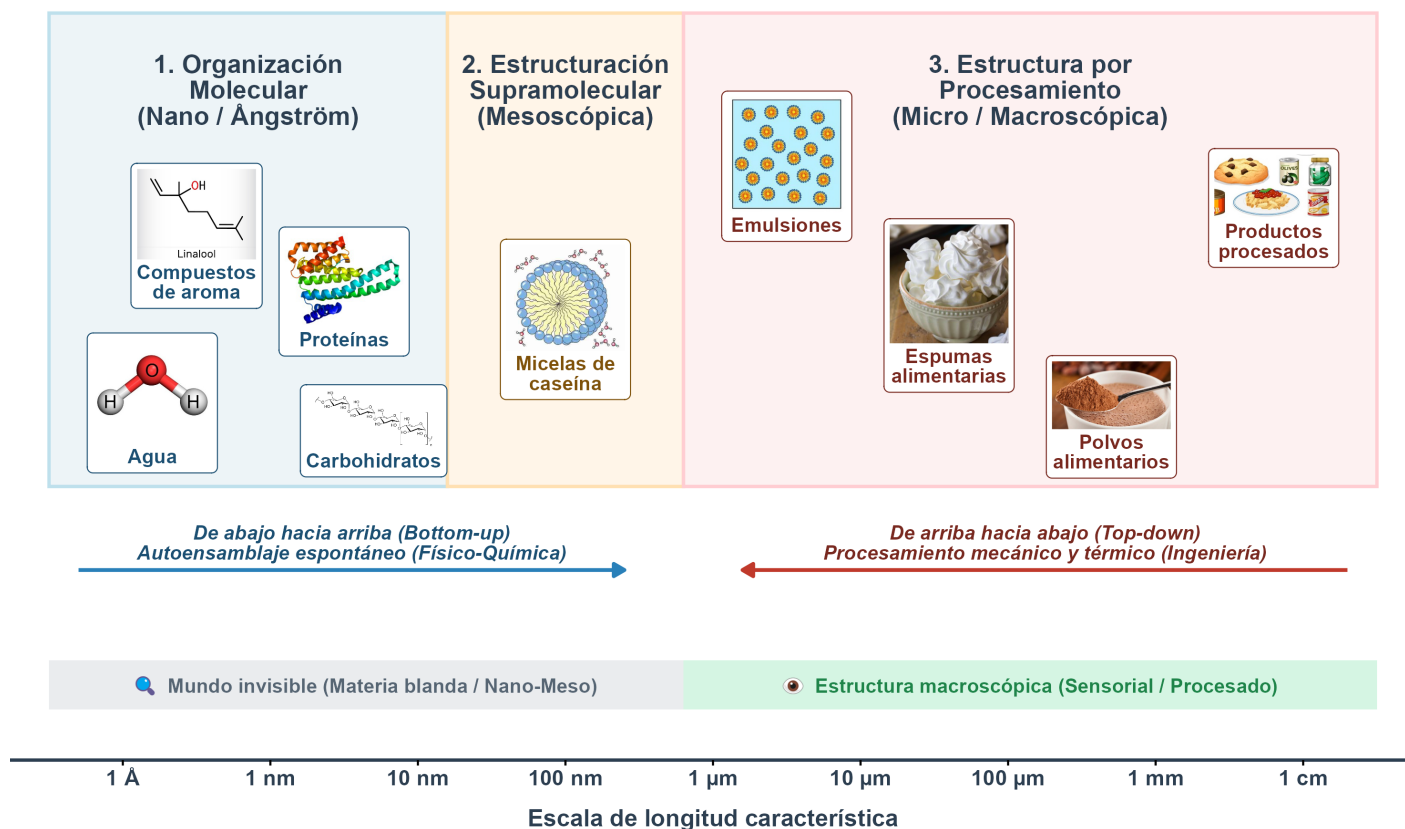


Figura 2. Escalas características y ejemplos de compuestos y estructuras en alimentos. Adaptado de [5]. Las imágenes representativas dentro del esquema son de uso libre bajo licencia Creative Commons (CC BY-SA 4.0).

(α) glucosídico (Figura 1-A). Estos enlaces son de tipo covalente y se dan entre las unidades más básicas de los carbohidratos (los monosacáridos) para dar lugar a los polisacáridos. La amilosa y la amilopectina interactúan mediante una densa red de puentes de hidrógeno que le da al gránulo su forma compacta y rígida. En contraste, la celulosa, donde abundan los enlaces de tipo beta (β) glucosídico (también enlaces covalentes, pero en configuración opuesta a los alfa glucosídicos), se ensambla en estructuras fibrosas, muy sólidas e indigeribles diseñadas para brindar soporte mecánico a la pared celular vegetal (Figura 1-B). De esta forma podemos concluir que no solo los tipos de enlace glucosídico, que es lo que determina su digestibilidad, sino también la forma en que se ensamblan estructuras a nivel mesoscópico (10 nm a 1 μ m) influyen sobre las propiedades de materiales de composición similar [5].

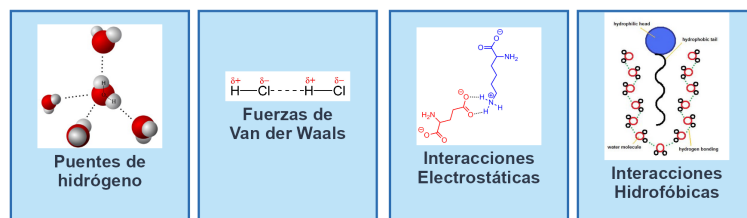
Las propiedades emergentes en lo que comemos

Como lo ilustramos en la primera sección, si hablamos de alimentos podemos considerarlos como estructuras altamente complejas, sin importar si son procesados o frescos, donde interactúan una gran variedad de componentes, desde biopolímeros (carbohidratos y proteínas) hasta compuestos de bajo peso molecular (aromas, sabores, pigmentos, conservadores, etc.). Un ejemplo en nuestras cocinas es la mayonesa que, a pesar de su aparente sencillez, resulta ser un sistema complejo compuesto principalmente por una emulsión de aceite en agua. Las emulsiones son sistemas denominados coloidales, lo cuales están formados por la dispersión de gotitas de un líquido inmisible (no soluble) en otro líquido. A estos sistemas se les suele añadir un tercer

componente, un emulsionante, para evitar la separación de fases. Con esto en mente las propiedades de la mayonesa no podrían predecirse estudiando por separado, y de forma aislada, cada gotita de aceite o molécula de agua. Por ejemplo, al considerar la estabilidad de una emulsión, la tendencia natural a que ambas fases se separen, esta propiedad emerge como resultado de las interacciones moleculares, a nivel nano y micro, entre las gotitas de aceite dispersas, el agua que las rodea y el emulsionante añadido [6].

Comprender las propiedades emergentes en un alimento requiere pasar a través de una escala de longitud de más de ocho órdenes de magnitud (Figura 2). En un extremo (1 Å a 10 nm), tenemos la organización molecular donde el agua, las proteínas y las moléculas de aroma interaccionan a nivel atómico. Al avanzar a la escala mesoscópica (10 nm a 1 µm) se presenta la estructuración supramolecular, donde las moléculas se autoensamblan (o interaccionan) creando estructuras más complejas como las micelas de la leche. Finalmente, en la escala macroscópica (1 µm a 1 cm) es donde apreciamos muchas de las propiedades del alimento y también donde los tratamientos mecánicos y térmicos moldean su estructura final, generando muchas de las texturas que percibimos directamente en nuestra boca [7]. Estudiar la matriz de un alimento desde moléculas individuales hasta el producto final (estudiarlo de “abajo hacia arriba”) es complicado si se quisieran tomar en cuenta todas las posibles interacciones y microestructuras que pueden darse de forma natural o por efecto del procesamiento. En cambio, abordar el estudio de “arriba hacia abajo” es más sencillo y nos permite analizar cómo el procesamiento influye o modela la microestructura a mesoescala (creando gotas, burbujas o redes), deter-

Mecanismos principales de interacción no covalente



Proceso de
autoensamblado

Arquitecturas supramoleculares resultantes en matrices alimentarias

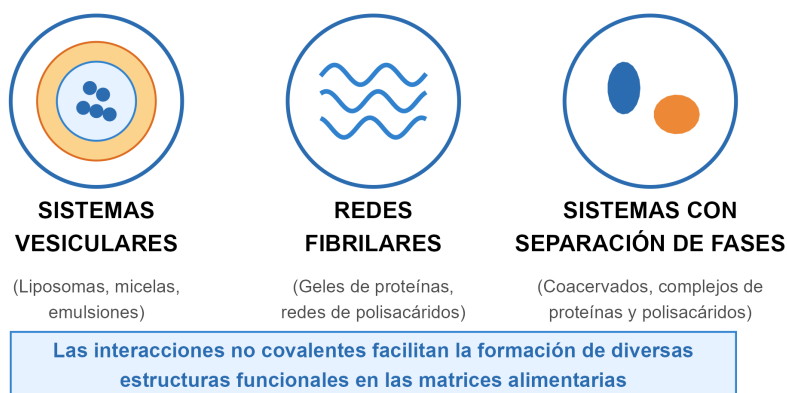


Figura 3. Estructuras emergentes en alimentos por interacciones no covalentes. Adaptado de [6]. Nota: Las imágenes representativas dentro del esquema son de uso libre bajo licencia Creative Commons (CC BY-SA 4.0).

minando así la estabilidad y texturas finales del producto. Por lo anterior, al estudiar o formular alimentos solemos hacerlo desde un enfoque de “arriba hacia abajo” y no al contrario [5, 6].

Una forma de abordar el estudio de sistemas alimenticios complejos, desde niveles moleculares a macroscópicos, es a través de la física de materia blanda (*soft matter physics*), la cual se encarga de estudiar materiales “flexibles” que no son sólidos rígidos ni líquidos simples, sino que están en una región intermedia o comparten propiedades de ambos estados. Esta área de la ciencia abarca el estudio de interacciones a nivel molecular y cómo éstas influyen o determinan propiedades ma-

macroscópicas como la viscosidad, elasticidad, textura, estabilidad, entre otras. En particular, se enfoca en sistemas o materiales como polímeros, coloides, emulsiones, geles y espumas, las cuales presentan una organización en escalas de longitud intermedias (de nanómetros a micrómetros). Lo que caracteriza a estos sistemas es que presentan interacciones moleculares débiles tales como atracción o repulsión de cargas (Fuerzas de Van der Waals), puentes o enlaces de hidrógeno, interacciones iónicas e interacciones hidrofóbicas. En conjunto esto produce sistemas altamente sensibles a deformaciones bajo fuerzas muy pequeñas, lo que al final se traduce en muchas de las propiedades físicas y sensoriales en alimentos (Figura 3). El punto clave de estas interacciones débiles es que no alteran la identidad química de los átomos, pero condicionan su comportamiento colectivo de tal forma que funcionan como “pegamentos moleculares”. Regresando a las micelas de caseína, pensemos en la transformación de la leche en yogur: al añadir fermentos lácticos, el pH baja y neutraliza la carga eléctrica de las caseínas, permitiendo que éstas se atraigan entre sí para inducir el autoensamblaje de una red tridimensional que atrapa al agua en su interior, dándole a este producto su apariencia semisólida característica [4].

¿Cómo se puede aplicar y qué falta por descubrir?

Considerar las propiedades emergentes en la ciencia de los alimentos permite innovar desde un enfoque de formulación empírico, basado en el ensayo y error, hacia un diseño racional y sustentable de matrices alimentarias. Hay que reconocer que cualidades como la textura e incluso la biodisponibilidad no son el resultado de una mera combinación de ingredientes aislados, sino respuestas complejas que emergen de la estructura de la materia blanda en la mesoescala. Esto abre muchas

posibilidades tecnológicas y también facilita el desarrollo de alternativas sostenibles (como análogos de carne a partir de proteínas vegetales), la formulación de productos reducidos en grasa, pero con idéntica respuesta sensorial en el paladar, y el diseño de alimentos funcionales a la medida de cada consumidor. Es importante resaltar que, a pesar de los avances actuales, aún hay desafíos por superar. Uno de los mayores consiste en perfeccionar el modelamiento computacional y las simulaciones de dinámica molecular para predecir propiedades macroscópicas desde un enfoque de “abajo hacia arriba”. Asimismo, se requiere profundizar en el estudio *in vivo* de la dinámica de retención y descomposición de la matriz alimentaria durante las etapas de masticación y digestión. La unión entre la física de materia blanda, el análisis sensorial y la fisiología gastrointestinal será la clave para diseñar alimentos capaces de combatir enfermedades metabólicas y responder a las demandas de sostenibilidad del siglo XXI [3, 7].

Agradecimientos

El autor agradece la beca de posdoctorado (CVU 689991) otorgada por la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI). Lo anterior hizo posible la realización de este artículo.

Declaración de uso de inteligencia artificial

Durante la elaboración de este escrito, el autor utilizó el modelo Gemini (Google) con los objetivos de mejorar la redacción, la ortografía y el código computacional en R (versión 4.6.1) para generar las Figuras 2 y 3. Tras este proceso, el autor revisó, editó y tomó total responsabilidad del contenido y conclusiones publicadas.

Referencias

- [1] Barham, P., Skibsted, L. H., Bredie, W. L. P., Bom Frøst, M., Møller, P., Risbo, J., Snitkjær, P., & Mortensen, L. M. (2010). Molecular gastronomy: A new emerging scientific discipline. *Chemical Reviews*, 110(4), 2313–2365. <https://doi.org/10.1021/cr900105w>
- [2] Turgeon, S. L., & Rioux, L.-E. (2011). Food matrix impact on macronutrients nutritional properties. *Food Hydrocolloids*, 25(8), 1915–1924. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.02.026>
- [3] Delgado Martín, J. (2018). El fenómeno de la emergencia. *Anales de Química de la RSEQ*, 114(4), 249-256. <https://analesdequimica.es/index.php/AnalesQuimica/article/view/1109>
- [4] Sieroka, N., Lossau, T., & Neudecker, T. (2024). Emergent properties in chemistry - relating molecular properties to bulk behavior. *Chemistry A European Journal*, 30(25), e202303868. <https://doi.org/10.1002/chem.202303868>
- [5] Ubbink, J., Burbidge, A., & Mezzenga, R. (2008). Food structure and functionality: A soft matter perspective. *Soft Matter*, 4(8), 1569. <https://doi.org/10.1039/b802183j>
- [6] Pawde, S., & Dave, J. (2025). Applications of soft matter physics in food science: From molecular interactions to macro-scale food. *Sustainable Food Technology*, 3(4), 979–1004. <https://doi.org/10.1039/D5FB00172B>
- [7] Mahajan, P., Bera, M. B., & Prasad, K. (2023). Food physics insight: The structural design of foods. *Journal of Food Science and Technology*, 60(6), 1643–1655. <https://doi.org/10.1007/s13197-022-05400-9>