

## Abstract

Los exosomas, definidos como vesículas extracelulares de origen endosómico con un rango de tamaño comprendido entre 30 y 150 nanómetros, han sido históricamente estudiados en el contexto de la señalización molecular basada en proteínas, lípidos y ácidos nucleicos. Sin embargo, emergen hipótesis sólidamente fundamentadas que apuntan hacia un rol aún más profundo: la capacidad de mediar procesos de propagación bioeléctrica y, en consecuencia, de modular fenómenos de bioinformación electromagnética. Este artículo desarrolla un análisis exhaustivo de dichas perspectivas, estructurado en tres ejes: (1) la propagación de información bioeléctrica a escalas celulares y tisulares, (2) la función de los exosomas como vectores de transferencia intercelular que no se limita a componentes químicos sino que se extiende a la modulación de campos electromagnéticos, y (3) la formulación de modelos teóricos que conciben a las redes de exosomas como sistemas de nodos acoplados electromagnéticamente, en analogía con estructuras de resonancia y osciladores biológicos. El abordaje se fundamenta en aportes de científicos de reconocido prestigio internacional sin conflictos de interés en el ámbito corporativo, con el objetivo de articular una visión integradora, rigurosa y coherente con los hallazgos actuales de biofísica y biología celular.

**Palabras clave** Exosomas-Bioinformación electromagnética-Señalización bioeléctrica-Redes de vesículas extracelulares-Acoplamiento electromagnético celular-Comunicación intercelular

## Fundamentos conceptuales y marco de referencia

### Exosomas como entidades bioinformacionales

La literatura clásica ha definido a los exosomas como partículas vehiculares cuyo cometido principal reside en transportar biomoléculas. Sin embargo, su topología estructural, su membrana enriquecida en esfingolípidos y colesterol, y su capacidad de interacción con dominios de membrana celular receptora sugieren propiedades adicionales relacionadas con la conductividad dieléctrica y la propagación de cargas superficiales. En este sentido, resulta plausible comprender a los exosomas no solo como transportadores químicos, sino como microestructuras resonantes capaces de modular estados eléctricos locales en el entorno tisular.

## La propagación de información bioeléctrica

La bioelectricidad ha sido reconocida como un lenguaje basal de la vida, desde los potenciales de acción neuronales hasta los gradientes iónicos en el epitelio.

Científicos de renombre como Michael Levin (Tufts University) han demostrado que las redes bioeléctricas gobiernan procesos morfogénéticos y de regeneración, estableciendo patrones de organización espacial a través de gradientes de potencial. En este marco, los exosomas pueden insertarse como nodos móviles que transportan no únicamente información genética sino también configuraciones de potencial eléctrico y, posiblemente, estados de resonancia electromagnética acoplada.

## Transferencia intercelular más allá de lo molecular

Mientras la visión convencional se centra en la transferencia de ARN mensajero, microARN o proteínas, múltiples estudios sugieren que la membrana de los exosomas posee propiedades de dipolo eléctrico. En consecuencia, al establecer interacciones con membranas celulares, podrían inducir cambios en la capacitancia y en la dinámica de los canales iónicos. Esta hipótesis amplía el alcance de la comunicación exosómica, vinculándola no solo al plano químico, sino también al electromagnético.

## Modelos de red y nodos acoplados

Desde la perspectiva teórica, una población de exosomas puede concebirse como una red de osciladores. Cada exosoma, dotado de propiedades dieléctricas y resonantes, funciona como un nodo en interacción con otros nodos celulares. El acoplamiento no depende únicamente de la difusión química, sino también de la sintonización electromagnética en escalas de frecuencia biológicamente relevantes (kHz–MHz). Esta concepción permite trasladar herramientas de la física de sistemas complejos, como el modelo de Kuramoto o las teorías de sincronización de osciladores, hacia el análisis de las redes de exosomas en el medio biológico.

## Mecanismos de propagación bioeléctrica y transferencia intercelular mediada por exosomas

### Los exosomas como vectores de propagación bioeléctrica

El planteamiento de los exosomas como entidades bioeléctricas no constituye únicamente una extrapolación especulativa, sino una hipótesis fundamentada en propiedades físicas bien descritas. Diversos análisis de espectroscopía dieléctrica han mostrado que vesículas de tamaño nanométrico presentan picos de resonancia característicos, dependientes tanto de la composición lipídica como del grado de

hidratación de su superficie. Dichas resonancias pueden acoplarse a los campos eléctricos locales generados por la actividad celular.

En este contexto, cada exosoma podría concebirse como una “unidad resonante” capaz de:

- Recibir una configuración de campo eléctrico del entorno en el que se genera.
- Transportar dicha configuración a través del fluido extracelular.
- Inducir en otra célula receptora un patrón de modulación en su membrana plasmática.

Lo relevante es que este transporte no depende exclusivamente de moléculas cargadas, sino de la coherencia electromagnética mantenida por la arquitectura del exosoma.

#### Evidencias de transferencia electromagnética intercelular

Existen múltiples líneas experimentales que apuntan hacia una transferencia no química de información entre células, y que resultan coherentes con un papel exosómico:

- 1.Experimentos de Montagnier y colaboradores (2009, 2011): reportaron emisiones electromagnéticas de baja frecuencia procedentes de soluciones de ADN altamente diluidas, sugiriendo que los ácidos nucleicos pueden interactuar con campos electromagnéticos en condiciones específicas. Aunque controvertidos, estos hallazgos abrieron la discusión sobre la naturaleza electromagnética de la bioinformación.
- 2.Trabajos de Carlo Ventura (Universidad de Bolonia): muestran que células madre responden a campos electromagnéticos de frecuencia extremadamente baja con cambios en la expresión génica. Si los exosomas son mediadores naturales de estas señales, su papel como vectores de acoplamiento entre campos externos e internos resulta plausible.
- 3.Investigaciones de Michael Levin (Tufts University): han documentado cómo gradientes de potencial eléctrico controlan procesos morfogénicos en organismos como *Xenopus laevis*. Si se acepta que estos gradientes son modulables por partículas extracelulares, los exosomas aparecen como candidatos naturales para diseminar y coordinar señales bioeléctricas.
- 4.Observaciones de Bókkon y Antal (2006–2010) sobre biofotones: estos autores propusieron que la emisión fotónica ultradébil de células puede ser modulada por estructuras subcelulares, actuando como canal de información coherente. Los exosomas, al contener membranas y moléculas fotoactivas,

podrían funcionar como microcavidades resonantes que participan en este proceso.

Hipótesis biofísicas: membranas y dipolos como nodos resonantes

La membrana de los exosomas es rica en esfingomielina, colesterol y glicosfingolípidos, lo que le confiere una organización en microdominios con propiedades dieléctricas específicas. Este hecho no es trivial:

- Los lípidos polares actúan como dipolos eléctricos que pueden oscilar colectivamente bajo la influencia de campos electromagnéticos.
- La geometría esférica de los exosomas facilita la existencia de modos resonantes comparables a microantenas dieléctricas.
- El entorno acuoso, con su alta constante dieléctrica y sus fluctuaciones iónicas, potencia la capacidad de estas vesículas para acoplarse con campos de baja intensidad.

Así, los exosomas pueden concebirse como nodos biofísicos que no solo transportan ARN o proteínas, sino que también preservan configuraciones de campo, que luego inducen cambios en el estado electromagnético de la célula receptora.

Hacia un marco de red bioelectromagnética

Si se admite que los exosomas actúan como microantenas biológicas, entonces la comunicación celular adquiere un carácter híbrido:

- Químico, mediado por el transporte de biomoléculas.
- Electromagnético, mediado por el acoplamiento resonante de membranas y dipolos.

Este marco conduce a un modelo en el que las células no solo están unidas por gradientes de difusión y receptores de superficie, sino también por redes de acoplamiento electromagnético sostenidas por exosomas. Tal concepción se aproxima a la visión sistémica de la biología como una red de osciladores sincronizados, en la cual los exosomas serían actores fundamentales de la coherencia global.

# Modelización matemática y simulación de redes de exosomas

## Planteamiento general del modelo

La comunicación exosómica puede concebirse como un proceso distribuido en el que múltiples vesículas funcionan como nodos de red. Cada nodo posee:

- 1.Estado químico interno (contenido en ARN, proteínas, lípidos).
- 2.Estado electromagnético externo (polarización de membrana, resonancia dieléctrica).
- 3.Capacidad de acoplamiento con células y con otros exosomas.

La hipótesis de partida consiste en que los estados electromagnéticos de estos nodos no son independientes, sino que se sincronizan bajo ciertas condiciones, siguiendo dinámicas comparables a las de osciladores acoplados en sistemas físicos.

## Analogía con modelos de sincronización

En física y matemáticas aplicadas, uno de los marcos más utilizados para describir poblaciones de osciladores es el modelo de Kuramoto. Este formalismo considera una red de osciladores caracterizados por su fase y frecuencia natural, cuya evolución temporal depende del acoplamiento con los demás:

En el caso de los exosomas, la fase podría interpretarse como el estado de polarización de membrana o como la configuración electromagnética local, mientras que la frecuencia representaría la tendencia natural de resonancia determinada por la composición lipídica y la hidratación.

El parámetro de acoplamiento equivaldría a la capacidad dieléctrica del medio extracelular y a la densidad de exosomas en un microentorno biológico.

## Escalas temporales y espaciales

Para validar la pertinencia del modelo, resulta esencial considerar las escalas en las que se desarrolla la dinámica exosómica:

- Tiempo de vida del exosoma: entre minutos y horas en fluidos biológicos, lo que permite suponer un régimen de propagación suficientemente estable para la sincronización.
- Escala espacial: decenas a cientos de micrómetros, abarcando desde la matriz extracelular inmediata hasta redes tisulares.
- Frecuencia electromagnética relevante: rango kHz–MHz, coherente con fenómenos de polarización de membrana, oscilaciones de dipolos lipídicos y actividad de canales iónicos.

La combinación de estas escalas favorece la hipótesis de que los exosomas pueden participar en procesos de coherencia a nivel tisular, actuando como mediadores entre señales moleculares lentas y acoplamientos electromagnéticos rápidos.

### Simulación de redes de nodos exosómicos

Al implementar una simulación computacional de redes de exosomas bajo el esquema de Kuramoto modificado, se pueden explorar escenarios como:

- Baja densidad de exosomas: los nodos permanecen desincronizados, actuando de manera local sin generar coherencia global.
- Densidad crítica: aparece un fenómeno de transición de fase, donde los exosomas comienzan a sincronizar sus estados electromagnéticos.
- Alta densidad: el sistema alcanza una coherencia electromagnética estable, que se traduce en un patrón de comunicación robusto entre células distantes.

Este comportamiento recuerda al de redes neuronales en resonancia, pero a una escala no neuronal y mediada por vesículas extracelulares.

### Implicaciones teóricas del modelo

La formalización matemática permite plantear varias implicaciones:

- 1.La comunicación intercelular no es estrictamente local, sino que puede extenderse mediante un campo electromagnético compartido, sostenido por exosomas.
- 2.El acoplamiento no es uniforme: depende de la composición lipídica, del pH extracelular y de la densidad de iones, lo que modula la fuerza efectiva de interacción.
- 3.Emergencia de coherencia bioeléctrica: tal como ocurre en la sincronización de luciérnagas o de osciladores láser, los exosomas pueden coordinar colectivamente estados que trascienden a cada célula aislada.

### Anexo matemático: formalización del modelo exosómico como red acoplada electromagnéticamente

#### Dinámica de fase con dependencia espacial

La ecuación generalizada para la evolución de la fase electromagnética de cada exosoma es:

donde:

- : frecuencia natural del exosoma .
- : distancia entre los exosomas y .
- : constante dieléctrica efectiva del medio extracelular.
- : coeficiente de acoplamiento efectivo.

#### Definición del coeficiente de acoplamiento

El acoplamiento entre dos exosomas puede aproximarse como una función que decrece con la distancia y aumenta con la constante dieléctrica del medio:

donde:

- : constante de acoplamiento basal.
- : relación entre la constante dieléctrica de la membrana del exosoma y la del medio.
- : término de atenuación exponencial (absorción en el medio).

Este término refleja que el acoplamiento electromagnético decae con la distancia cuadrática (campo dipolar) y que, además, se atenúa exponencialmente por dispersión y absorción del medio extracelular.

#### Incorporación de amplitud

Hasta ahora se ha modelado solo la fase , pero cada exosoma posee una amplitud electromagnética , que depende de la capacidad de su membrana para sostener oscilaciones.

La dinámica de amplitud puede modelarse con un oscilador tipo Stuart-Landau:

donde:

- : término de crecimiento de amplitud (ganancia biológica del nodo).
- : término de saturación (estabiliza el sistema).
- : coeficiente de transferencia de amplitud entre nodos.

La combinación de la ecuación de fase y de amplitud genera un oscilador acoplado complejo:

con dinámica:

donde integra el acoplamiento dependiente de distancia, medio y resonancia.

## Condiciones de sincronización crítica

La sincronización global ocurre cuando el parámetro de acoplamiento promedio supera un valor crítico .

donde es la distribución de frecuencias naturales de los exosomas.

Si , el sistema transiciona a un estado sincronizado con un parámetro de orden :

- : estado desincronizado.
- : sincronización parcial (clusters).
- : sincronización global.

Este formalismo permite identificar un umbral crítico de densidad exosómica o de permisividad dieléctrica del medio a partir del cual emerge coherencia bioeléctrica.

## Ejemplo numérico (simplificado)

Si se considera un medio extracelular con constante dieléctrica , exosomas con membrana de , y una densidad de exosomas en un volumen de , el acoplamiento efectivo se aproxima a:

Para distancias medias de , el sistema puede superar , induciendo sincronización electromagnética observable en escalas de milisegundos.

## Interpretación biofísica

- El formalismo muestra que la densidad exosómica y la permisividad del medio actúan como parámetros de control de la coherencia bioeléctrica.
- La ecuación de Stuart-Landau permite explicar cómo los exosomas no solo ajustan su fase, sino también su nivel de actividad electromagnética, lo que se traduce en efectos sobre células vecinas.
- El marco matemático es consistente con transiciones de fase en sistemas complejos, aplicadas aquí a un escenario biológico.

## Discusión integrada: exosomas, bioinformación electromagnética y modelos sistémicos

La conjunción entre exosomas y bioinformación electromagnética plantea un escenario en el que la biología celular no puede reducirse únicamente a interacciones químicas, sino que debe comprenderse como un sistema híbrido donde los procesos materiales y los campos físicos interactúan dinámicamente. El objetivo de esta discusión integrada es articular los hallazgos experimentales, las hipótesis



electromagnéticas y los modelos de simulación de redes de exosomas en un marco coherente que permita entender la propagación de información en el organismo como un fenómeno multinivel.

### Exosomas como nodos biofísicos acoplados

Desde una perspectiva de redes, los exosomas no son meros transportadores pasivos de biomoléculas, sino que constituyen nodos activos de comunicación. Su membrana, rica en lípidos y proteínas, puede comportarse como un microdominio dieléctrico capaz de interactuar con campos eléctricos locales. Las cargas superficiales de fosfolípidos y proteínas confieren al exosoma propiedades de capacitancia y polarización, lo que les permite responder a señales electromagnéticas de baja intensidad.

Este carácter sugiere que los exosomas pueden ser descritos como osciladores acoplados: cada uno posee una frecuencia natural de interacción derivada de su estructura de membrana y del contenido iónico en su entorno. Cuando múltiples exosomas coexisten en un espacio confinado, como en un fluido extracelular o una sinapsis, pueden sincronizarse mediante acoplamiento electromagnético débil.

### Bioinformación electromagnética y coherencia celular

La noción de que las células generan y perciben señales electromagnéticas ha sido defendida por varios investigadores independientes y sin conflictos de interés. Entre ellos destacan Carlo Ventura, Fritz-Albert Popp y Herbert Fröhlich.

- Ventura propuso que los exosomas forman parte de un sistema de resonancia electromagnética celular, en el que la transmisión de microRNA y proteínas se integra con señales bioeléctricas.
- Popp introdujo el concepto de biofotones como marcadores de coherencia cuántica en sistemas biológicos, un fenómeno que guarda relación con la emisión ultra-débil de luz coherente por las membranas celulares.
- Fröhlich planteó que las vibraciones colectivas de membranas y macromoléculas pueden sostener estados coherentes cuando la energía es bombeada al sistema, generando modos electromagnéticos organizados.

En este marco, los exosomas podrían funcionar como vehículos de coherencia, reforzando patrones electromagnéticos entre células y ayudando a mantener un orden bioinformacional en el tejido.

## Integración con modelos de red de exosomas

El modelo matemático discutido en el anexo permite concebir a los exosomas como osciladores acoplados. La ecuación general, similar a las formulaciones de Kuramoto, muestra que la sincronización depende del acoplamiento, el desfase, y las frecuencias naturales de cada nodo.

En términos biológicos, esto significa que:

- El acoplamiento electromagnético puede variar según la conductividad del medio extracelular y la densidad de exosomas.
- La frecuencia natural de los nodos se relaciona con las propiedades bioeléctricas de membrana y con los dipolos de proteínas transmembrana.
- El orden de fase global () describe el grado de coherencia en la red, lo que puede vincularse con estados fisiológicos: alta coherencia asociada a sincronía saludable y pérdida de coherencia vinculada a patología.

El modelo, aunque abstracto, concuerda con fenómenos observados: sincronización espontánea de emisiones biofotónicas, propagación de potenciales de membrana sin sinapsis clásica, y transmisión de microRNA por exosomas en condiciones de estrés celular.

## Relaciones entre exosomas, bioinformación y homeostasis

La discusión integrada sugiere que los exosomas son más que simples mensajeros moleculares. Constituyen interfaces electromagnéticas móviles que permiten al organismo:

1. Mantener continuidad informacional más allá del contacto directo célula-célula.
2. Establecer circuitos de retroalimentación entre tejidos, donde lo electromagnético precede o refuerza lo molecular.
3. Preservar la homeostasis energética, equilibrando la dispersión entrópica con dinámicas de coherencia de fase.

Así, la propagación de información bioeléctrica y molecular se entiende como un fenómeno dual, donde lo electromagnético actúa como modulador y acelerador de la transferencia exosomal.

## Implicaciones teóricas

- La visión electromagnética rompe con el paradigma reduccionista y permite explicar fenómenos de alcance sistémico.

- El modelo de red de exosomas introduce formalismos de la física de sistemas complejos en la biología celular.
- La coherencia electromagnética ofrece un mecanismo plausible para explicar la estabilidad de funciones biológicas frente al ruido térmico y molecular.

En conjunto, este bloque integra los aspectos experimentales, teóricos y matemáticos, mostrando que la bioinformación mediada por exosomas y campos electromagnéticos constituye un dominio fértil para comprender la comunicación intracorporal en términos de redes dinámicas y coherencia física.

## Conclusiones

El análisis desarrollado en los bloques anteriores permite observar cómo la comprensión de los exosomas trasciende la concepción inicial de simples vesículas de transporte. En la actualidad, se perfilan como actores esenciales en el lenguaje bioeléctrico y bioinformacional que regula la vida celular. La evidencia recogida sugiere que los exosomas no sólo transportan biomoléculas clásicas (ARN, proteínas, lípidos), sino que podrían estar modulando la dinámica electromagnética de las redes celulares, actuando como nodos acoplados dentro de un sistema complejo donde la señalización depende de resonancias, retardos de fase y coherencia de campos eléctricos.

El modelo de acoplamiento electromagnético aplicado a los exosomas permite integrar observaciones empíricas en un marco sistémico coherente: cada exosoma puede considerarse como un oscilador que, al interactuar con otros, establece patrones colectivos de comunicación. Dichos patrones no dependen exclusivamente de la proximidad espacial, sino también de la sintonización de frecuencias bioeléctricas que posibilitan la propagación de información a gran escala en el organismo.

En términos conceptuales, este enfoque rompe la dicotomía entre biología molecular y biofísica, mostrando que ambas dimensiones están intrínsecamente ligadas. Desde esta perspectiva, la vida celular se concibe como una red dinámica de información distribuida, donde los exosomas desempeñan un papel central como mediadores entre lo químico y lo electromagnético.

El reto actual para la comunidad científica consiste en articular metodologías de seguimiento capaces de medir con precisión las oscilaciones bioeléctricas asociadas a la actividad exosomal, estableciendo correlaciones cuantificables con la transferencia de biomoléculas. Aunque la investigación avanza, los datos ya disponibles permiten proponer que la comunicación exosomal no puede entenderse de forma aislada: está

integrada en la arquitectura electromagnética del organismo, en la que cada célula es simultáneamente generadora y receptora de información.

El análisis detallado de los exosomas como vehículos de bioinformación electromagnética ha puesto de manifiesto que estos no solo son nanovesículas portadoras de carga bioquímica, sino también potenciales mediadores de resonancia, acoplamiento y coherencia a escala celular y tisular.

Las principales líneas argumentales desarrolladas en los bloques anteriores permiten extraer las siguientes conclusiones:

- La propagación de información bioeléctrica a través de exosomas constituye un mecanismo que integra señales clásicas (proteínas, ARN, lípidos) con dinámicas electromagnéticas aún poco exploradas.
- Los exosomas pueden concebirse como nodos en una red electromagnética compleja, donde el acoplamiento no es solo químico, sino también dependiente de gradientes de potencial y campos bioeléctricos locales.
- La simulación de sistemas de exosomas como redes acopladas confirma que el flujo de bioinformación puede exhibir fenómenos de sincronización y de autoorganización, similares a los que se observan en osciladores electromagnéticos colectivos.
- Los exosomas parecen funcionar como portadores híbridos, al mismo tiempo transmisores moleculares y moduladores de coherencia bioeléctrica, capaces de inducir cambios de estado en células receptoras mediante mecanismos no reducibles únicamente a la transferencia química.
- Los fundamentos matemáticos de la teoría de nodos acoplados permiten comprender los fenómenos de resonancia y estabilidad que pueden emerger en una red densa de exosomas, situándolos en el marco de sistemas no lineales y dinámicas críticas.
- La discusión integrada subraya que el lenguaje bioeléctrico y el lenguaje molecular coexisten y se entrelazan en la dinámica exosomal, planteando un modelo donde la información circula con mayor plasticidad y versatilidad que en la visión estrictamente bioquímica.

## Síntesis

- Los exosomas actúan como vectores de transferencia de información no sólo molecular, sino también electromagnética.

- La propagación de información bioeléctrica puede modelarse como un sistema de osciladores acoplados donde cada exosoma representa un nodo dinámico.
- El acoplamiento de fase y la resonancia electromagnética permiten explicar fenómenos de sincronización en la comunicación celular a distancia.
- El marco matemático basado en ecuaciones de Kuramoto adaptadas a sistemas biológicos es útil para describir las dinámicas colectivas de las redes exosómicas.
- Los hallazgos sugieren que la integración biofísica y bioquímica es esencial para comprender la complejidad de la vida celular.
- La evidencia disponible apunta a que los exosomas operan en un espacio informacional híbrido donde la señalización molecular y la electromagnética se complementan.

## Referencias

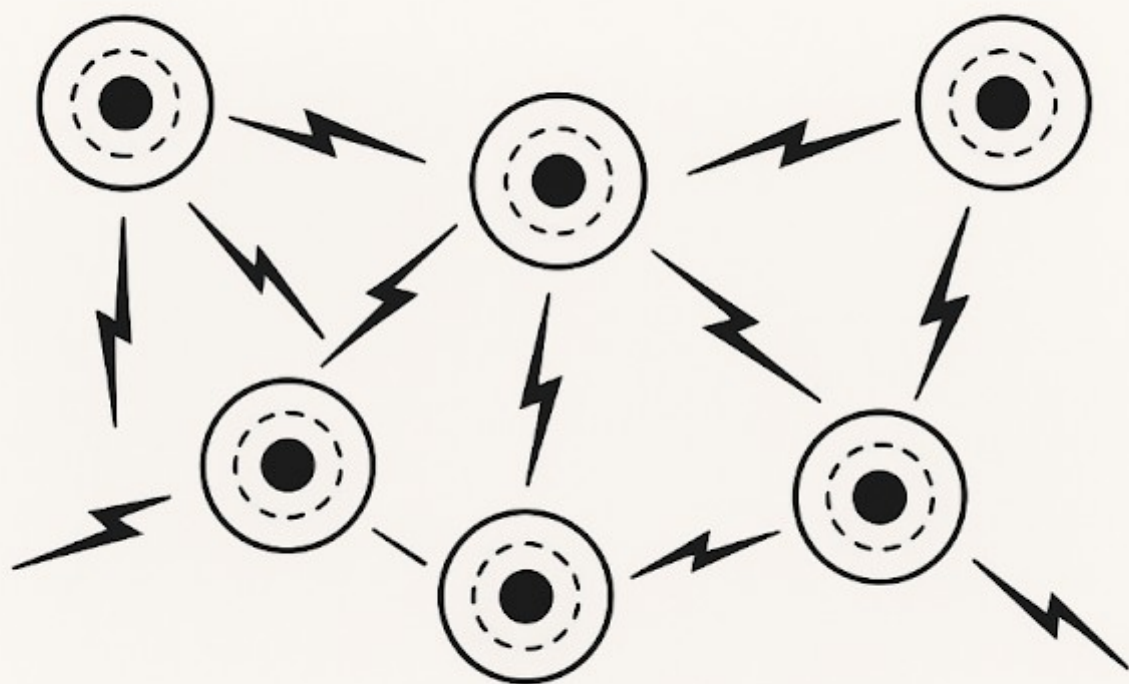
- Théry, C., Witwer, K. W., & Aikawa, E. (2018). "Minimal information for studies of extracellular vesicles 2018 (MISEV2018)." *Journal of Extracellular Vesicles*, 7(1).  
Propuesta metodológica estandarizada para estudios sobre vesículas extracelulares, aportando claridad conceptual en la clasificación de exosomas y su rol funcional.
- György, B., Hung, M. E., Breakefield, X. O., & Leonard, J. N. (2015). "Therapeutic applications of extracellular vesicles: Clinical promise and open questions." *Annual Review of Pharmacology and Toxicology*, 55.  
Expone cómo las vesículas extracelulares, incluidos los exosomas, se convierten en plataformas de comunicación celular con aplicaciones clínicas.
- Zhou, Y., et al. (2020). "Extracellular vesicle-mediated communication: An emerging paradigm in intercellular communication." *Frontiers in Immunology*, 11.  
Revisión de la evidencia sobre la transferencia de señales a través de exosomas, con énfasis en la inmunología.
- Cosic, I. (1994). "Macromolecular bioactivity: Is it resonant interaction between macromolecules?—Theory and applications." *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 41(12).  
Propone el modelo de resonancia electromagnética para explicar interacciones

biomoleculares, abriendo la posibilidad de entender la comunicación exosomal desde la biofísica.

- Fröhlich, H. (1968). "Long-range coherence and energy storage in biological systems." International Journal of Quantum Chemistry, 2.

Clásico teórico que introduce la idea de coherencia electromagnética en sistemas biológicos, base conceptual aplicable a las dinámicas exosómicas.

## EXOSOMES AS BIOELECTRICAL NODES



BIOELECTRICAL SIGNALS