

Reconstrucción semiautomática de la cavidad endometrial en 4D: cuantificación de la contractilidad

Autor: Belen Moliner

Tutora: Aura Hernandez-Sabate

Resumen

La contractilidad uterina es un fenómeno clave en la implantación embrionaria, pero su análisis ha estado limitado por la dificultad de medirla de forma objetiva y, especialmente, de manera que abarque todo el volumen de la cavidad endometrial. En este trabajo se presenta una plataforma innovadora basada en técnicas de visión por computador que permite segmentar la cavidad y la línea endometrial, propagar dichas segmentaciones a lo largo de todos los frames mediante flujo óptico y generar reconstrucciones dinámicas tridimensionales del útero. A partir de estas máscaras se derivaron métricas cuantitativas de contracciones de la cavidad endometrial y de movimientos internos, definidos como actividad latente capturada mediante autoencoders aplicados sobre mapas de flujo. Todos los resultados se integraron en una base de datos MongoDB, lo que proporciona escalabilidad, facilita la gestión de la información clínica y habilita la visualización interactiva en una plataforma propia. Este sistema constituye una metodología reproducible y extensible para la caracterización objetiva de la contractilidad uterina y su potencial correlación con los resultados clínicos en medicina reproductiva.

Palabras clave- Contractilidad uterina, ecografía 4D, visión por computador, autoencoders, MongoDB, medicina reproductiva.

Abstract—

Uterine contractility is a key phenomenon in embryo implantation, but its analysis has been limited by the difficulty of objectively measuring it, particularly in a way that encompasses the entire volume of the endometrial cavity. In this work, we present an innovative platform based on computer vision techniques that enables segmentation of the endometrial cavity and line, propagation of these segmentations across all frames using optical flow, and the generation of dynamic three-dimensional reconstructions of the uterus. From these masks, quantitative metrics were derived for external contractions as well as for internal movements, defined as latent activity captured through autoencoders applied to flow maps. All results were integrated into a MongoDB database, providing scalability, facilitating clinical data management, and enabling interactive visualization through a dedicated platform. This system offers a reproducible and extensible methodology for the objective characterization of uterine contractility and its potential correlation with clinical outcomes in reproductive medicine.

Index Terms— Uterine contractility, 4D ultrasound, computer vision, autoencoders, MongoDB, reproductive medicine.



1. INTRODUCCIÓN

La transferencia embrionaria es una etapa crítica en los tratamientos de reproducción asistida, y su éxito depende de múltiples factores, entre los que se encuentra la receptividad uterina (Cimadomo et al., 2023). La contractilidad uterina desempeña un papel esencial en la función del útero, ya que se trata de un órgano muscular cuya frecuencia y patrones peristálticos varían a lo largo del ciclo menstrual para cumplir funciones reproductivas específicas. Durante la fase lútea, las contracciones deben ser mínimas bajo el efecto de la progesterona, lo que favorece la implantación embrionaria (Kuijsters et al., 2017).

Desde finales de la década de 1990, la contractilidad uterina ha sido evaluada mediante ecografía transvaginal, observando los movimientos tras la aceleración de los vídeos. Estos primeros estudios demostraron que las contracciones uterinas en el día de la transferencia embrionaria pueden influir en los resultados de los tratamientos de reproducción asistida (Fanchin y Ayoubi, 2009). Sin embargo, para evaluar de forma precisa la contractilidad uterina se requieren registros prolongados, ya que las contracciones se producen con una frecuencia relativamente baja; aproximadamente 1,6 por minuto en fase folicular tardía y 1,2 por minuto en fase lútea tardía (Rees et al., 2023). Esta baja frecuencia convierte el proceso en una tarea laboriosa y dependiente de la experiencia del observador (Kuijsters et al., 2017; Hunt et al., 2020).

Además, el análisis de la contractilidad uterina tiene limitaciones muy importantes. Primero es subjetivo al ojo del explorador, que es quien cuenta el número de ondas contráctiles. Segundo, y no menos importante, en los estudios realizados hasta la fecha solo se tenía en cuenta el corte longitudinal del útero, no siendo capaces de observar la contractilidad de toda la cavidad endometrial en volumen.

Con el fin de superar estas limitaciones, nuestro grupo ha explorado el uso de registros ecográficos 4D de seis minutos de duración para capturar la actividad dinámica del útero de manera reproducible. Trabajos previos demostraron una asociación significativa entre la contractilidad uterina y los niveles de progesterona (Moliner et al., 2021), en concordancia con el papel fisiológico de esta hormona en la modulación de la actividad uterina, y pudiendo ser el primer paso para una valoración de la contractilidad uterina en todo el volumen uterino. Sin embargo, todavía sigue siendo una medida subjetiva.

En este proyecto se propone medir de forma semiautomática la contractilidad uterina a partir de vídeos de ecografía de la cavidad endometrial, no

sólo la de la pared endometrial sino también los movimientos internos que se producen en el útero.

A continuación se describe el estado del arte en este ámbito de aplicación y los objetivos específicos del proyecto. La sección 3 del documento detalla la metodología usada para abordar los objetivos. Las secciones 4 y 5 explican y discuten los resultados obtenidos. Finalmente, la sección 6 resume las conclusiones del estudio.

2. ESTADO DEL ARTE

En los últimos años se ha incorporado la resonancia magnética dinámica (cine-MRI) para el estudio de la contractilidad uterina. Estos trabajos han demostrado que la visualización en el plano coronal permite caracterizar mejor la propagación de las ondas peristálticas en comparación con la evaluación exclusiva en el plano longitudinal (Shitano et al., 2016). Sin embargo, el uso clínico de la resonancia se encuentra restringido por su elevado coste, menor accesibilidad y la mayor duración de la exploración en comparación con la ecografía.

En ecografía se han desarrollado aproximaciones más avanzadas, como el uso de algoritmos de speckle tracking o el análisis de deformación (strain), que permiten caracterizar de manera semiautomática los patrones peristálticos (Huang et al., 2022; Wang et al., 2022). No obstante, estas técnicas requieren seleccionar manualmente puntos de referencia en el endometrio y se limitan al corte longitudinal en 2D, lo que reduce su automatización y no permite valorar el volumen completo de la cavidad.

De forma paralela, se han descrito métodos intrauterinos, como el ElectroUteroGraph (EUG) y el electrohisterograma intracavitario (IC-EHG), que registran la actividad eléctrica uterina desde dentro de la cavidad (Georgiou et al., 2022; Alberola-Rubio et al., 2025). Estos sistemas aportan una caracterización objetiva de frecuencia, amplitud y duración de las contracciones. Sin embargo, requieren la colocación de un catéter intrauterino, lo que supone un procedimiento invasivo que podría alterar la contractilidad y que no resulta aplicable en el contexto de una transferencia embrionaria, ya sea antes o inmediatamente después del procedimiento.

En conjunto, las metodologías actuales presentan limitaciones para una valoración objetiva, no invasiva y completa de la contractilidad uterina. Hasta la fecha, ninguna técnica ha permitido evaluar la dinámica de toda la cavidad endometrial en volumen. Este vacío justifica el desarrollo de nuevas aproximaciones basadas en ecografía 4D dinámica, capaces de integrar el plano coronal y

- *E-mail de contacto:* bmolinerb@gmail.com
- *Trabajo tutorizado por:* Aura Hernandez-Sabaté
- *Curso:* 2023-2025

longitudinal.

Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es desarrollar un método de segmentación automática de la cavidad y la línea endometrial en ecografías 4D, que permita generar reconstrucciones dinámicas en cuatro dimensiones y obtener métricas objetivas de contractilidad basadas en la variación volumétrica y en el grosor endometrial. Asimismo, se plantea el cálculo de los movimientos internos del útero a partir de señales latentes derivadas de mapas de flujo óptico. Como parte complementaria, se propone la creación de una plataforma de acceso rápido a los vídeos y a los resultados, que facilite la aplicación de todo el proceso de forma semiautomática, escalable y reproducible, favoreciendo su integración futura en el ámbito clínico. Y por último, se plantea la reconstrucción 4D de la cavidad endometrial con sus movimientos contráctiles.

3. METODOLOGIA

El presente trabajo desarrolla una metodología semiautomática para la cuantificación objetiva de la contractilidad uterina a partir de registros ecográficos dinámicos en 4D obtenidos durante la transferencia embrionaria. El diseño metodológico se centra en transformar los vídeos brutos en un conjunto estructurado de métricas cuantitativas, reproducibles y comparables entre pacientes.

El pipeline implementado (Figura 1) integra varias fases consecutivas tras la selección de la población y adquisición de videos de ecografías 4D : (i) preprocessamiento de los vídeos originales y división en vistas ortogonales (coronal y longitudinal), (ii) segmentación inicial mediante anotaciones manuales mínimas y propagación automática con flujo óptico, (iii) cálculo de métricas externas de contracción (volumen y

Tabla descriptiva de parámetros clínicos

Característica	Media	Desv. estándar	Min	P25	P50	P75	Máx
Longitud uterina (mm)	75,129	10,097	40,500	68,630	74,500	80,858	115,300
Grosor endometrial fase estrogénica (mm)	8,900	1,831	4,500	7,800	8,800	10,000	15,000
Grosor endometrial fase lútea (mm)	9,672	3,291	1,000	7,800	9,390	11,220	69,300
Volumen endometrial (ml)	4,975	37,496	0,475	2,170	2,900	4,395	105,600
Peristaltismo uterino (cpm)	1,128	0,673	0,000	0,600	1,000	1,600	4,300
VFI (%)	2,471	3,625	0,000	0,430	1,300	3,100	69,000
VFI (%)	0,783	1,331	0,000	0,140	0,314	0,990	19,000
Progesterona (ng/ml)	20,878	15,112	1,500	11,200	16,555	25,338	124,400

Tabla 1. La tabla muestra los valores descriptivos de las principales variables cuantitativas uterinas y hormonales.

grosor endometrial) y de movimientos internos latentes mediante autoencoders aplicados a mapas de flujo, (iv) reconstrucción 4D de la cavidad endometrial, y (v) persistencia de todos los resultados en una base de datos no relacional (MongoDB) con interfaz interactiva de visualización.

3.1 Población del estudio

Se incluyeron un total de 813 ecografías 4D correspondientes a 676 pacientes atendidas en el Instituto Bernabeu entre 2017 y 2024 el día de la transferencia embrionaria. De estas, 587 pacientes disponían de una única ecografía y 89 pacientes fueron evaluadas en dos o más ocasiones. La media de transferencias embrionarias previas fue de 3,9, lo que refleja una población con una trayectoria reproductiva significativa. Respecto a las características de los tratamientos en 327 casos (40,4%) se emplearon ovocitos donados y solo en 120 casos (15,6%) el ciclo correspondía a una transferencia en fresco. Se definió la variable factor uterino como la presencia de al menos una de las siguientes alteraciones: malformación uterina, útero torcido, miomas, sinequias intrauterinas, mucometra, endometriosis, adenomiosis, cesárea previa o hidrosalpinx. Según este criterio, 470 de 813 estudios (57,8%) presentaron algún factor uterino. En cuanto a las variables cuantitativas ecográficas y hormonales, los

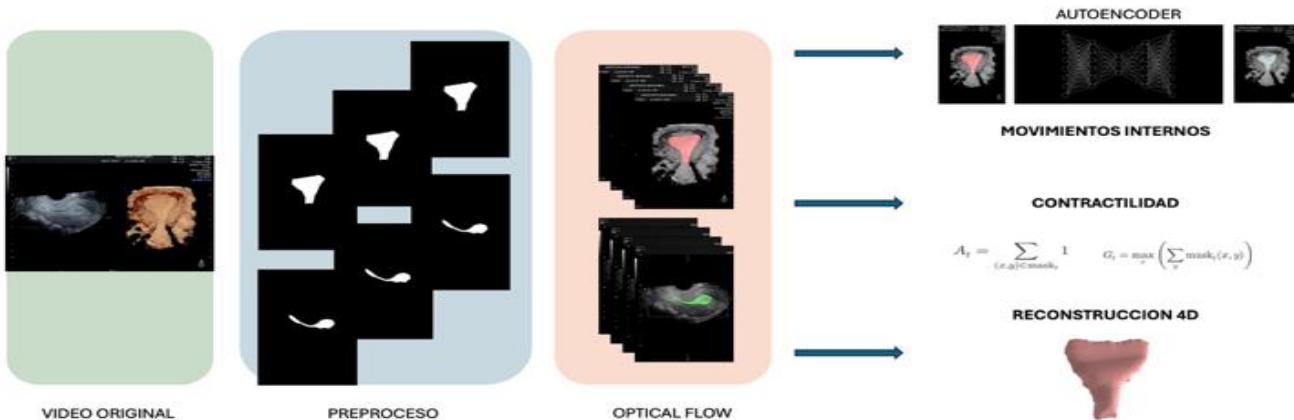


Figura 1. Flujo de trabajo

valores descriptivos se resumen en la tabla 1. En relación con los resultados clínicos, considerando los registros con datos completos, el embarazo bioquímico se obtuvo en 49,1% (369/752), el aborto bioquímico en 10,0% (75/752), aborto clínico en 7,3% (55/752), embarazo clínico en 32,9% (247/752) y recién nacido vivo en 28,7% (207/721).

Finalmente, con el objetivo de garantizar la confidencialidad de las pacientes, únicamente se seleccionaron aquellas ecografías que no contenían ningún dato identificativo en la imagen ni en los metadatos asociados. La única información disponible era la fecha de realización de la exploración, lo que permitía su trazabilidad sin comprometer la identidad de la paciente. De las 813 ecografías iniciales, tras aplicar este criterio se seleccionaron 274 exploraciones, que constituyeron la muestra definitiva utilizada en los análisis posteriores.

Adquisición de imágenes ecográficas 4D

Las exploraciones se realizaron mediante ecografía transvaginal 4D utilizando equipos de alta resolución (GE Voluson E10/E8, General Electric Healthcare, Austria) con sonda volumétrica endocavitaria RIC5-9-D de 5–9 MHz. El volumen dinámico se obtuvo en modo render HDlive, que permite la reconstrucción en plano coronal (4D) del útero. De forma simultánea, el software genera el plano longitudinal ortogonal, empleado como referencia para la línea endometrial (Figura 2). Cada adquisición se prolongó durante 6 minutos en tiempo real, que fueron acelerados para generar un vídeo final de aproximadamente 18–20 segundos, garantizando así la captura de varios ciclos de contractilidad uterina. Los vídeos se exportaron en formato MP4, identificados únicamente por un código anónimo, sin información clínica de la paciente, para su posterior procesamiento en



Figura 2. La parte izquierda muestra el plano ortogonal del plano A que corresponde al corte longitudinal, y la parte derecha muestra el corte coronal en 4D con HDLive

la plataforma de análisis.

3.2 Preprocesamiento de los videos

El primer paso del pipeline consiste en descomponer los vídeos ecográficos en secuencias de imágenes en escala de grises, de modo que cada frame pueda tratarse como unidad de análisis. Sobre cada imagen se realiza

una partición sistemática en dos mitades (Derecha e Izquierda), que representan las vistas anatómicas de interés: la vista coronal recoge la cavidad endometrial (Derecha) y la vista longitudinal refleja la línea endometrial (Izquierda). Esta división garantiza, en cada instante, la disponibilidad simultánea de la morfología global de la cavidad y de la dinámica local de la línea.

Para disponer de un conjunto de referencia manual, se anotaron frames en ambas vistas mediante la herramienta LabelMe. A partir de estos ficheros en formato JSON se generaron máscaras binarias por frame. Como control de calidad visual, se generaron superposiciones de



Figura 3. Superposiciones de validación con la mascara sobre el frame original

validación (Figura 3) superponiendo la máscara sobre el frame original, lo que permitió verificar la coherencia espacial de las anotaciones y detectar posibles desalineaciones. Este conjunto de máscaras de referencia, que era coherente en nomenclatura y alineación temporal, ha sido el punto de partida sobre el que, en fases posteriores, se propagan las segmentaciones al resto de frames.

3.3 Segmentación y propagación de máscaras

Una vez preprocesados los vídeos y definidas manualmente las máscaras de referencia en un conjunto reducido de fotogramas, es necesario extender estas segmentaciones al resto de la secuencia completa. Para ello se aplica un procedimiento de propagación automática de flujo óptico (Optical Flow) que aprovecha la información del movimiento entre fotogramas consecutivos.

El proceso consiste en utilizar los frames anotados como anclas a partir de las cuales se generan las máscaras de los fotogramas adyacentes. Mediante algoritmos de estimación de movimiento, se calcula cómo se desplazan los píxeles de un frame al siguiente, de manera que la máscara inicial puede deformarse y ajustarse al nuevo fotograma. De este modo, a partir de unas pocas segmentaciones manuales es posible obtener máscaras coherentes para la totalidad del vídeo, tanto en la vista

coronal (cavidad endometrial) como en la longitudinal (línea endometrial).

Para garantizar la calidad del resultado, cada máscara propagada se somete a un filtrado morfológico que elimina pequeños errores y permite mantener únicamente la región más representativa, llenando posibles huecos internos. Además, en los fotogramas donde existe una segmentación manual, esta tiene prioridad y actúa como un reseteo del proceso, asegurando la fidelidad al contorno real en puntos clave de la secuencia.

La propagación automática de las máscaras mediante flujo óptico se valida tanto de manera cualitativa como cuantitativa. Como control visual, todas las máscaras se guardan junto con imágenes de control visual en las que la segmentación se superpone al frame original, y se generan vídeos con estos resultados para su revisión, lo que permite comprobar la coherencia espacial de las segmentaciones. Además, se lleva a cabo una validación objetiva comparando las máscaras que han sido propagadas por unas manuales de referencia, con otras definidas manualmente y que no están implicadas en el proceso de propagación. Para ello se emplean métricas estándar de segmentación: Coeficiente de DICE (Dice Similarity Coefficient, DSC), IoU (Intersection over Union), HD95 (Hausdorff Distance en el percentil 95) y ASSD (Average Symmetric Surface Distance).

3.4 Cálculo de métricas de contractilidad

Se introduce por primera vez una valoración sistemática de la contractilidad uterina basada en la combinación de dos dimensiones complementarias: el área de la cavidad endometrial en la vista coronal y el grosor endometrial máximo en la vista longitudinal. Para su análisis se consideran las variaciones temporales de ambas señales y se definen episodios contráctiles.

- Área/Volumen intrauterino: Número de píxeles dentro de la máscara de cavidad en el frame t .

$$A_t = \sum_{(x,y) \in \text{mask}_t} 1$$

- Grosor endometrial: Máximo número de píxeles consecutivos ocupados en una columna, equivalente al mayor grosor medido en el eje horizontal.

$$G_t = \max_x \left(\sum_y \text{mask}_t(x, y) \right)$$

- Contracciones uterinas (detectadas en volumen) Identificación de episodios como pares de picos y valles:

- Duración mínima ≥ 1.5 s
- Caída relativa de volumen endometrial $\geq 30\%$

- Recuperación parcial $\geq 15\%$ en ventana posterior

Cada episodio permite definir características cuantitativas para objetivar la dinámica de la contracción:

1. Duración (s): tiempo comprendido entre el inicio y el final de la caída.
2. Amplitud relativa (px^2): magnitud de la reducción en el área o en el grosor respecto a la señal basal.
3. Velocidad (px^2/s): razón entre la amplitud de la contracción y su duración, que refleja la rapidez del fenómeno.
4. Frecuencia (cpm): número de episodios por minuto de registro, indicador del ritmo contráctil global.
5. Dirección: orientación predominante del desplazamiento tisular, expresada en grados ($^\circ$) en el plano polar (0° = craneal, 90° = derecha, 180° = caudal, 270° = izquierda).
6. Coherencia direccional: grado de alineación de los vectores de flujo, expresado como valor adimensional entre 0 y 1.

3.5 Cálculo de métricas de movimientos internos

Además de las medidas clásicas de contractilidad externa basadas en el área de la cavidad y el grosor endometrial, se introduce por primera vez un conjunto de métricas destinadas a caracterizar los movimientos internos de la cavidad endometrial. Dado que el grosor de la línea endometrial resulta demasiado reducido para ofrecer una estimación fiable de los desplazamientos tisulares, el análisis de los movimientos internos se limitó exclusivamente a la cavidad endometrial, cuyo mayor volumen permite una caracterización más robusta de la dinámica interna.

Para su análisis se emplea el flujo óptico restringido al interior de la cavidad segmentada, tratado como un campo de vectores de movimiento. Con el fin de estabilizar esta señal y reducir el ruido, se entrenó un autoencoder convolucional sobre recortes centrados en la cavidad y limitados estrictamente a su interior. En esta representación, cada par de fotogramas consecutivos se describe por la imagen en escala de grises, la máscara interna y los vectores de flujo óptico normalizados. De este modo, cada vector se interpreta con las propiedades de un vector de velocidad, lo que permite extraer parámetros análogos a los usados en física del movimiento. Dado que el flujo óptico no se expresa en unidades métricas absolutas, las magnitudes derivadas se reportan en unidades arbitrarias (a.e.), que permiten comparar cuantitativamente la dinámica entre vídeos:

1. Amplitud media (a.e.): magnitud media de las oscilaciones internas expresada en unidades arbitrarias (a.e.), derivadas de la intensidad del flujo

- óptico
2. Velocidad media (a.e./frame): rapidez relativa de los desplazamientos tisulares, expresada en unidades arbitrarias por frame, comparables entre vídeos aunque sin equivalencia física directa.
 3. Direccionalidad: proporción de vectores orientados en cada eje fisiológico (craneal, caudal, derecha, izquierda), que informa sobre el sentido de propagación de la onda contráctil.
 4. Duración(s): intervalo temporal durante el cual se mantiene una actividad interna organizada en la misma dirección.
 5. Coherencia direccional (0-1): grado de alineación entre los vectores, que diferencia episodios coordinados de aquellos en los que el movimiento es heterogéneo o desorganizado.

3.6 Reconstrucción 4D

Una vez segmentadas y propagadas las máscaras de la cavidad y la línea endometrial, se generaron reconstrucciones volumétricas dinámicas (4D) del útero a partir de las secuencias bidimensionales. Este procedimiento permitió pasar de una serie de cortes planos a un modelo tridimensional en movimiento, que refleja con continuidad la variabilidad del órgano a lo largo del tiempo. El proceso de reconstrucción se basó en la extrusión tridimensional de las máscaras obtenidas en la vista coronal (cavidad uterina), ajustando el grosor en función de la vista longitudinal (línea endometrial). De este modo se logró un volumen anatómicamente más realista.

Sobre este volumen se aplicó un algoritmo de reconstrucción de superficie (marching cubes), que permitió obtener una malla tridimensional continua.



Figura 4. Reconstrucción 4D de la cavidad endometrial obtenida a partir de segmentaciones automáticas, mostrando la morfología y el movimiento contráctil dinámico.

De manera innovadora, estas reconstrucciones incorporaron la modulación a partir de las series temporales de flujo óptico calculadas en la cavidad. Esto permitió añadir a la superficie reconstruida un patrón dinámico asociado al movimiento tisular, generando un modelo 4D en el que se representan tanto las contracciones externas como pequeñas oscilaciones que reflejan la actividad interna del útero.

El resultado final fue un vídeo tridimensional en movimiento que permite observar, por primera vez en ecografía, la dinámica volumétrica e intraluminal del útero en 4D, constituyendo una herramienta pionera para

la caracterización objetiva de la contractilidad uterina. Figura 4

3.7 Base de datos y plataforma de análisis

Para la gestión de los datos clínicos y de imagen derivados de este proyecto se optó por emplear una base de datos no relacional (MongoDB) en lugar de un sistema relacional clásico. La principal razón de esta elección fue la naturaleza heterogénea y multimodal de la información: por un lado, los datos clínicos de las pacientes, en formato tabular y con variabilidad en los registros; y por otro, los archivos de video ecográfico en 4D, sus secuencias de frames, las máscaras segmentadas, las métricas derivadas y los resultados intermedios de cada análisis.

MongoDB, como base de datos, permite almacenar en un mismo repositorio tanto la información clínica como las rutas a los recursos de imagen y los resultados de cada etapa del pipeline. Cada vídeo quedó vinculado a un identificador único de paciente (anonimizado) y a una serie de campos que incluyen metadatos, parámetros ecográficos, métricas de contractilidad, series temporales y outcomes clínicos asociados. Sobre esta base de datos se construyó una plataforma interactiva de análisis y directamente conectada a MongoDB, que permite visualizar los videos originales y las reconstrucciones 4D, consultar las métricas de contractilidad extraídas automáticamente, acceder a resúmenes y plots de contracciones externas e internas y relacionar los patrones de contractilidad con las variables clínicas, lo que proporciona un entorno flexible, escalable y accesible, que centraliza toda la información y habilita análisis tanto cuantitativos como visuales, sentando las bases para la reproducibilidad y la futura extensión del sistema a un mayor número de casos clínicos.

4. RESULTADOS

Del conjunto inicial de vídeos ecográficos anonimizados, se seleccionaron dos registros representativos para el desarrollo y la validación metodológica del pipeline: los vídeos 104098_1 y 108599_1. La elección se basó en su buena calidad de imagen y visibilidad de las estructuras de interés, lo que permitió garantizar la consistencia en la segmentación y el análisis temporal de la contractilidad.

4.1 Muestra del estudio

Tanto 104098_1 como 108599_1 fueron atendidas el día de la transferencia embrionaria y no presentaban factores uterinos mayores que comprometieran la interpretación del movimiento.

La paciente 104098_1, de 42 años, sin antecedentes reproductivos de interés, presenta dos embriones

transferidos sin resultado. Tras someterse a un tratamiento de preparación endometrial con ciclo artificial, se realiza transferencia embrionaria de un blastocisto vitrificado procedente de un tratamiento de donación de ovocitos, con resultado negativo en el test de embarazo bioquímico.

La paciente 108599_1 de 49 años, sin antecedentes reproductivos de interés, presenta ocho embriones transferidos sin resultado. Tras someterse a un tratamiento de preparación endometrial con ciclo natural modificado, se realiza transferencia embrionaria de un blastocisto vitrificado procedente de un tratamiento de donación de ovocitos, con resultado positivo en el test de embarazo bioquímico y siendo la gestación evolutiva a las 20 semanas de gestación.

Parámetros Ecográficos y Hormonales

Característica	104098_1	108599_1
Histerometría (mm)	100,0	106,2
Grosor endometrial LE1 (mm)	11,0	11,5
Grosor endometrial LE2 (mm)	13,1	12,3
Volumen endometrial (mL)	9,37	13,11
Contracciones uterinas (cpm)	2,6	0,6
VI (%)	2,2	0,7
VFI (%)	0,7	0,2
Progesterona (ng/ml)	13,5	51,78

Tabla 2. Características ecográficas de las pacientes seleccionadas

4.2 Preprocesamiento de las imágenes

Cada vídeo se descompuso en secuencias de imágenes en escala de grises (frames), que constituyeron la unidad básica de análisis. Posteriormente, cada frame se dividió sistemáticamente en dos mitades ortogonales: la vista coronal, que recoge la morfología global de la cavidad endometrial, y la vista longitudinal, que refleja la línea endometrial. Esta separación permitió disponer, para cada instante, de información simultánea sobre los cambios globales y locales de la contractilidad uterina.

En el primer vídeo seleccionado (104098_1), la descomposición dio lugar a 464 frames, de los cuales se definieron manualmente 29 frames por cada vista (coronal y longitudinal). En el segundo vídeo (108599_1), se obtuvieron 548 frames, con una anotación manual de 40 frames por vista.

4.3 Segmentación y propagación de máscaras

Una vez definidas las segmentaciones manuales iniciales, se procedió a extender dichas máscaras al resto de cada vídeo mediante un procedimiento de propagación automática basado en flujo óptico. Con el fin de validar objetivamente la propagación automática, se definió un conjunto ampliado de 107 máscaras manuales. Sobre estos frames se compararon las máscaras obtenidas automáticamente frente a las manuales, utilizando las métricas estándar de evaluación de segmentación. La validación objetiva demostró un excelente rendimiento

del procedimiento de propagación automática en la cavidad endometrial, con un DICE medio de 0,93 y una variabilidad muy baja entre frames (desviación estándar del 1,7 %, equivalente a menos del 7 % de diferencia relativa). El 99 % de los frames presentaron valores de DICE $\geq 0,90$, lo que confirma la gran consistencia del método. Los resultados se complementaron con un IoU medio de 0,88, una ASSD de 2,5 px y un HD95 de 17,8 px, lo que refleja un solapamiento robusto y una adecuada precisión en los bordes. En la línea endometrial también se alcanzaron resultados positivos, con un DICE medio de 0,89 e IoU medio de 0,80, manteniendo una buena concordancia entre segmentaciones automáticas y manuales. Además, la ASSD fue baja (1,8 px) y el HD95 de 7,7 px indicó una correcta estabilidad de los contornos a lo largo de la secuencia.

4.4 Cálculo de métricas de contractilidad

Una vez obtenidas las segmentaciones completas de la cavidad y la línea endometrial, se procede al cálculo de métricas cuantitativas que describen de manera objetiva la contractilidad uterina.

Primero se calcula el área de la cavidad endometrial y el grosor de la línea endometrial (apartado 3.4) y se las trata como señales. Estas señales se analizan de manera integrada. Las contracciones se detectan principalmente en la señal de área, identificando pares pico-valle que cumplen criterios de caída relativa (30%), recuperación parcial(15%) y duración mínima(1,5s). En este trabajo se establece un umbral de caída $\geq 30\%$ en área, ya que valores inferiores podrían confundirse con variaciones derivadas del propio proceso de segmentación. Este umbral se fundamenta en la validación previa, en la que el error medio entre segmentaciones automáticas y manuales (DICE =0,93) corresponde a una variabilidad máxima cercana al 7 %, de modo que una caída del 30 % garantiza que el descenso observado obedece a un fenómeno fisiológico y no a ruido técnico.

De forma complementaria, la señal de grosor se emplea para identificar episodios adicionales cuando se cumplen condiciones más estrictas de prominencia, duración y caída relativa. En este caso, el umbral se fija en $\geq 30\%$ de reducción del grosor, puesto que el menor tamaño relativo de esta señal la hace más sensible al ruido de segmentación. Este criterio asegura que los eventos detectados en la línea endometrial reflejan verdaderos cambios locales de la dinámica tisular y no simples oscilaciones técnicas. Además, solo se consideran como válidos aquellos episodios de grosor que no se solapan con una contracción ya detectada en el área y que no se asocian a variaciones relevantes en el volumen global, permitiendo así capturar contracciones focales invisibles en la señal coronal. A partir de estos episodios se extraen

distintas métricas descriptivas, ya explicadas en metodología.

4.5 Cálculo de métricas de los movimientos internos

Además de las contracciones externas derivadas de los cambios de área y grosor endometrial, este trabajo analiza por primera vez los movimientos internos del útero, es decir, aquellas variaciones dinámicas que no se traducen necesariamente en un encogimiento global de la cavidad, pero que reflejan la actividad intrínseca del miometrio y pueden tener un papel relevante en la receptividad endometrial.

Para su estudio se emplearon los vectores latentes

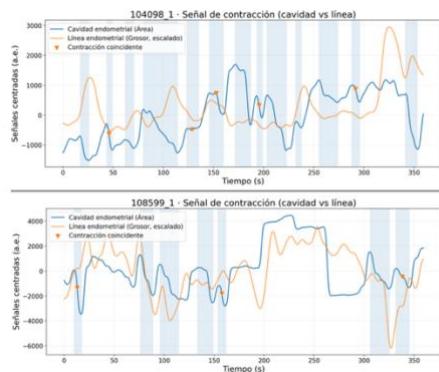


Figura 5. Señal de contracción uterina en cavidad y línea endometrial.

obtenidos mediante un autoencoder convolucional, entrenado con cuatro canales de entrada (intensidad, máscara y los vectores de flujo óptico u y v). De este modo, cada fotograma se representa como un vector latente que resume el patrón interno de movimiento. La variación entre vectores consecutivos se trató como una señal temporal, que se suavizó para reducir el ruido y resaltar los incrementos sostenidos de actividad.

La detección de episodios internos se basó en criterios de prominencia y amplitud de la señal latente, junto con un ancho mínimo de 1–2 segundos. En términos prácticos, se consideraron episodios internos aquellos intervalos en los que la variación latente superaba al menos un 30 % respecto a la línea de base y presentaban amplitud ≥ 1.0 a.e. y duración suficiente. Una vez identificados, los episodios fueron caracterizados en términos de amplitud, duración, velocidad, dirección predominante y

5. DISCUSIÓN

En ambos casos(104098_1 y 108599_1) fue posible aplicar de manera completa el pipeline desarrollado, que incluyó la extracción de frames, la segmentación manual inicial, la propagación automática de las máscaras a lo largo de toda la secuencia y la generación de reconstrucciones dinámicas en 4D.

En relación con las contracciones externas (Tabla 3), derivadas de la variación de volumen de la cavidad endometrial, se observaron diferencias relevantes entre ambos vídeos. Figura 5. En el caso de 104098_1, tanto el análisis automático como la visualización directa identificaron un total de trece contracciones a lo largo de los seis minutos de registro, lo que corresponde a una frecuencia aproximada de 2,17 contracciones por minuto. La amplitud mediana de estas oscilaciones fue de 750 px² y la duración media se situó en torno a los 11,6 segundos por episodio. La dirección predominante del movimiento se orientó hacia 276° (craneal-izquierda) y se observaron cinco episodios de solapamiento entre las contracciones de la

Métricas de CONTRACCIONES EXTERNAS

Característica	104098_1	108599_1
N contracciones	13	7
Frecuencia (cpm)	2,167	1,167
Dur med (s)	11,638	13,139
Vel med (px ² /s)	72,15	184,37
Amplitud med (px ²)	750,26	2785,79
%Cada med	124,96	528,46
Dirección media (°)	276,752	74,26
Coherencia media	0,719	0,661

Tabla 3. Características de la contractilidad de los dos videos seleccionados
cavidad y de la línea endometrial.

Por su parte, en el vídeo 108599_1 el análisis automático detectó un total de siete contracciones, lo que equivale a 1,17 contracciones por minuto, con una amplitud claramente superior (2785 px²) y una duración más prolongada, cercana a los 13,1 segundos. La dirección media del movimiento se orientó hacia 74° (craneal-derecha) y se identificaron tres solapamientos con la línea endometrial. Sin embargo, la evaluación visual únicamente permitió reconocer cuatro episodios, quedando tres contracciones sin identificar a simple vista. Esta discrepancia podría deberse a que mientras el análisis automático descompone la señal en contracciones individuales siguiendo criterios matemáticos, la inspección visual integra esas oscilaciones menores dentro de un patrón más global.

En conjunto, estos hallazgos sugieren la existencia de patrones de contractilidad claramente distintos entre ambos registros. Mientras que en 104098_1 predominan

contracciones más frecuentes, de menor magnitud y duración más corta, compatibles con una actividad más rítmica y homogénea, en 108599_1 las contracciones son menos numerosas, pero mucho más intensas y prolongadas, lo que traduce un patrón más potente y heterogéneo. La discrepancia entre el conteo automático y la observación visual subraya, además, el valor de la metodología cuantitativa desarrollada, que permite identificar episodios contráctiles que de otro modo podrían pasar inadvertidos.

En ambos vídeos se calcularon velocidades medias tanto en la cavidad como en la línea endometrial, junto con la coherencia direccional y el grado de alineación entre ambas vistas. En el caso del vídeo 104098_1, la velocidad media en la cavidad fue de 72,15 px²/s, con una coherencia direccional de 0,71, mientras que en el vídeo 108599_1 la velocidad media alcanzó los 184,3 px²/s, con una coherencia de 0,66. Esta diferencia sugiere que, mientras el primer registro presenta contracciones más ordenadas y coordinadas, el segundo muestra oscilaciones más veloces pero menos estructuradas.

En cuanto a los movimientos internos (Tabla 4), detectados mediante el análisis del flujo óptico y autoencoders, se observaron patrones muy diferenciados entre ambos registros. En el vídeo 104098_1, se identificaron tres episodios internos. Con una amplitud media de 0,66 unidades arbitrarias (a.e.), velocidad media de 0,01 a.e./frame y duración de más de 10 segundos, lo que refleja oscilaciones definidas, aunque de larga duración. La coherencia direccional fue alta (0,74), indicando que el movimiento interno siguió una orientación bien marcada hacia 327° (craneal-izquierda).

En contraste, el vídeo 108599_1 mostró una mayor cantidad de episodios internos, con seis eventos. Una amplitud media de 8,8 unidades arbitrarias, acompañada de una velocidad media de 0,17 a.e./frame y duración de casi 9 segundos. La dirección predominante se orientó hacia 115° (caudal-derecha), con una coherencia alta (0,74), lo que indica movimientos bien organizados y consistentes.

Métricas de MOVIMIENTOS INTERNOS

Característica	104098_1	108599_1
N episodios	3	6
Frecuencia (epis/min)	0,5	1,0
Dur med (s)	10,862	8,869
Vel med (a.e./frame)	0,085	0,175
Amp med (a.e.)	0,661	1,362
Dirección μ (°)	327,42	115,26
Coherencia med	0,744	0,739

Tabla4. Características de los movimientos internos divididos por paciente y por cavidad endometrial y línea endometrial (endometrio).

En conjunto, los resultados muestran que el vídeo 104098_1 se caracterizó por una frecuencia más baja de

episodios internos, más duraderos y de magnitud moderada, aunque con alta coherencia. En cambio, el vídeo 108599_1 presentó una dinámica opuesta, con un mayor número de episodios, de mayor amplitud y más rápidos, aunque con desplazamientos en la cavidad de menor magnitud e intensidad. Un hallazgo especialmente llamativo fue la relación inversa observada entre el número de contracciones externas y los movimientos internos del miometrio. En el vídeo 104098_1, caracterizado por un mayor número de contracciones externas (13 episodios), se detectaron únicamente tres episodios internos, de larga duración y amplitud moderada. En cambio, en el vídeo 108599_1, donde el número de contracciones externas fue menor (7 episodios), se identificaron seis movimientos internos, más amplios y de menor duración. Este patrón sugiere que la presencia de contracciones uterinas podría limitar la aparición de movimientos internos coordinados del miometrio. Dado que estos desplazamientos podrían favorecer la dinámica de transporte e implantación embrionaria. Resulta plausible plantear que un exceso de contracciones externas actúe como un factor competidor o incluso inhibidor de dichos movimientos internos. En este sentido, el equilibrio entre ambos tipos de actividad podría tener un papel relevante en la receptividad endometrial y en el éxito de la implantación embrionaria.

6. CONCLUSIONES

El presente trabajo ha permitido diseñar y aplicar un pipeline de análisis para la evaluación objetiva de la contractilidad uterina a partir de ecografías 4D.

Existen dos aproximaciones recientes para la cuantificación objetiva de la contractilidad uterina. Por un lado, Wang et al. (2022) desarrollaron un algoritmo automático basado en flujo óptico aplicado sobre vídeos bidimensionales de ecografía transvaginal, centrado en la deformación de la línea endometrial y en la estimación de número, dirección e intensidad de las ondas peristálticas. Por otro lado, Huang et al. (2022) propusieron un análisis de deformación mediante speckle tracking y cálculo de tasas de strain radial en las paredes anterior y posterior del endometrio, con el fin de caracterizar la velocidad, dirección y coordinación de las ondas propagadas en cada pared. En contraste, la metodología presentada en este trabajo adopta una perspectiva distinta, al centrarse en la cavidad endometrial completa como unidad funcional. A partir de máscaras segmentadas en planos ortogonales, se calcularon métricas dinámicas que reflejan la variación global de la cavidad, integrando tanto contracciones externas como actividad interna latente. Este enfoque permite detectar contracciones que afectan de manera simultánea a ambos lados de la cavidad, y que podrían pasar inadvertidas en métodos basados únicamente en la línea endometrial. Además, la reconstrucción volumétrica

4D aporta una visualización dinámica del útero en movimiento, ofreciendo un marco más realista para el estudio de la contractilidad.

Desde un punto de vista fisiológico, la contractilidad uterina se fundamenta en el acortamiento de las fibras musculares miometriales, que se traduce en un cambio real de la geometría uterina. En este contexto, la variación del área de la cavidad endometrial constituye un marcador más directo y objetivo de la actividad contráctil global que la simple oscilación de la línea endometrial o la deformación puntual de las paredes anterior y posterior. Mientras que los métodos basados en flujo óptico bidimensional o en strain radial capturan desplazamientos locales de la mucosa, la aproximación por retracción de la cavidad endometrial refleja de manera integrada los efectos mecánicos de la contracción sobre toda la cavidad. Este enfoque ofrece una representación más fiel del fenómeno fisiológico subyacente y una medida potencialmente más reproducible y menos dependiente de la subjetividad del observador.

Limitaciones del estudio

Finalmente, es importante señalar las limitaciones de este trabajo. El análisis se ha realizado únicamente sobre dos vídeos, lo que restringe la generalización de los resultados. Además, aunque las máscaras de referencia han permitido extraer métricas robustas, por el momento no ha sido posible desarrollar un método de aprendizaje automático capaz de segmentar automáticamente la cavidad y la línea endometrial. Este hecho obliga todavía a la definición manual de un número limitado de frames por vídeo para obtener las medidas de contractilidad, lo que supone un proceso tedioso y con dependencia del observador. Aun así, este trabajo constituye una primera demostración de la viabilidad de aplicar metodologías de análisis volumétrico e inteligencia artificial para caracterizar de forma objetiva la contractilidad uterina en 4D.

7. LINEAS ABIERTAS

El presente trabajo no solo ha permitido establecer una metodología para la evaluación objetiva de la contractilidad uterina, sino también sentar las bases de una plataforma integrada de análisis y gestión de datos. Dicha plataforma posibilita la visualización directa de los vídeos ecográficos ya procesados con sus métricas de contractilidad asociadas, permitiendo además al investigador definir manualmente, los frames de interés para la segmentación y propagación de máscaras. Este flujo abre la puerta a incorporar progresivamente un mayor número de vídeos al sistema, garantizando que todos los resultados queden registrados de forma estructurada en la

base de datos no relacional diseñada para este proyecto.

La integración de todos los vídeos y sus métricas en una base de datos no relacional ofrece un potencial de desarrollo considerable. En primer lugar, permitirá en el futuro abordar el entrenamiento de un método de aprendizaje automático capaz de segmentar automáticamente la cavidad y la línea endometrial, eliminando la necesidad de la anotación manual y acelerando el procesamiento de grandes volúmenes de datos. En segundo lugar, al vincular los resultados derivados del análisis de la contractilidad con las variables clínicas, ecográficas y de resultados reproductivos ya disponibles, la plataforma facilitará la realización de comparaciones estadísticas avanzadas. Esto permitirá no solo validar la relevancia clínica de los parámetros de contractilidad identificados, sino también explorar su valor predictivo en relación con los resultados de los tratamientos de reproducción asistida.

En conjunto, estas líneas abiertas consolidan a la plataforma como un entorno dinámico y escalable que puede evolucionar desde el procesamiento manual hacia el análisis automatizado y hacia la integración clínica de la contractilidad uterina como biomarcador objetivo de receptividad endometrial.

8. BIBLIOGRAFIA

- [1] J.S. B Alberola-Rubio, J. Diaz-Martinez, A., Mira-Tomas, J.M., Faubel, P.A., Sanz, S.C., Cortés, G.C., de Arriba-Garcia, M., Aparicio, J.L., Garcia-Casado, J., 2025. Intracavitary-Electrohysterogram: Novel technique for assessing uterine peristalsis and electrophysiology in non-pregnant women. Eur. J. Obstet. Gynecol. Reprod. Biol. 309, 131–136. <https://doi.org/10.1016/j.ejogrb.2025.03.042>
- [2] Cimadomo, D., Rienzi, L., Conforti, A., Forman, E., Canosa, S., Innocenti, F., Poli, M., Hynes, J., Gemmell, L., Vaiarelli, A., Alviggi, C., Ubaldi, F.M., Capalbo, A., 2023. Opening the black box: why do euploid blastocysts fail to implant? A systematic review and meta-analysis. Hum. Reprod. Update 29, 570–633. <https://doi.org/10.1093/humupd/dmad010>
- [3] Fanchin, R., Ayoubi, J.M., 2009. Uterine dynamics: Impact on the human reproduction process. Reprod. Biomed. Online 18, S57–S62. [https://doi.org/10.1016/S1472-6483\(10\)60450-6](https://doi.org/10.1016/S1472-6483(10)60450-6)
- [4] Georgiou, J., Lekkas, K., Varnava, G., Sophocleous, M., Michaelides, A., Tanos, V., 2022. The ElectroUteroGraph: A Novel Tool for Assessing Uterine Contractions of Non-Pregnant Women. IEEE Open J. Eng. Med. Biol. 3, 34–40. <https://doi.org/10.1109/OJEMB.2022.3159097>
- [5] Huang, Y., Rees, C., Sammali, F., Blank, C., Schoot, D., Mischi, M., 2022. Characterization of Uterine Peristaltic Waves by Ultrasound Strain Analysis. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control 69, 2050–2060.

<https://doi.org/10.1109/TUFFC.2022.3165688>

- [6] Kuijsters, N.P.M., Methorst, W.G., Kortenhorst, M.S.Q., Rabotti, C., Mischi, M., Schoot, B.C., 2017. Uterine peristalsis and fertility: current knowledge and future perspectives: a review and meta-analysis. *Reprod. Biomed. Online* 35, 50–71. <https://doi.org/10.1016/j.rbmo.2017.03.019>
- [7] Rees, C.O., de Boer, A., Huang, Y., Wessels, B., Blank, C., Kuijsters, N., Huppelschoten, A., Zizolfi, B., Foreste, V., Di Spiezio Sardo, A., Christoforidis, N., van Vliet, H., Mischi, M., Schoot, B.C., 2023. Uterine contractile activity in healthy women throughout the menstrual cycle measured using a novel quantitative two-dimensional transvaginal ultrasound speckle tracking method. *Reprod. Biomed. Online* 46, 115–122. <https://doi.org/10.1016/j.rbmo.2022.08.104>
- [8] Shitano, F., Kido, A., Kataoka, M., Fujimoto, K., Kiguchi, K., Fushimi, Y., Togashi, K., 2016. Evaluation of uterine peristalsis using cine MRI on the coronal plane in comparison with the sagittal plane. *Acta radiol.* 57, 122–127. <https://doi.org/10.1177/0284185115579080>
- [9] Wang, Y., Li, X., Wei, N., Liu, Y., Liu, X., Sun, R., Huang, C., Yao, B., Wang, H., 2022. Automated measurement of endometrial peristalsis in cine transvaginal ultrasound images. *Front. Physiol.* 13, 1–9. <https://doi.org/10.3389/fphys.2022.983177>