

TEMA 9

POTENCIALES EXTRACELULARES GENERADOS POR EL CORAZÓN: EL ELECTROCARDIOGRAMA (ECG)

Chema Ferrero

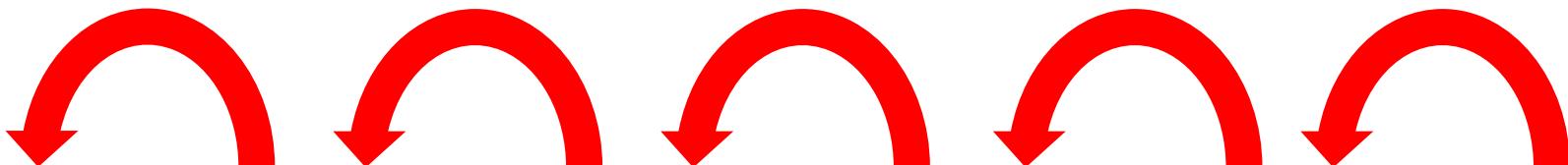
Bioelectricidad

Grado en Ingeniería Biomédica

Naturaleza multiescala de la bioelectricidad



Lo que ocurre en una escala tiene consecuencias en las escalas superiores...



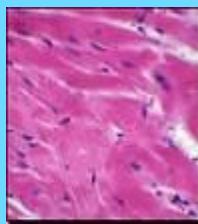
Cuerpo



Órgano



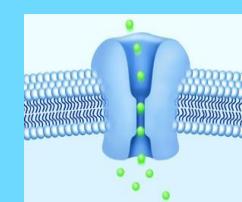
Tejido



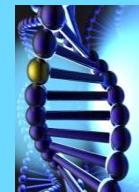
Célula



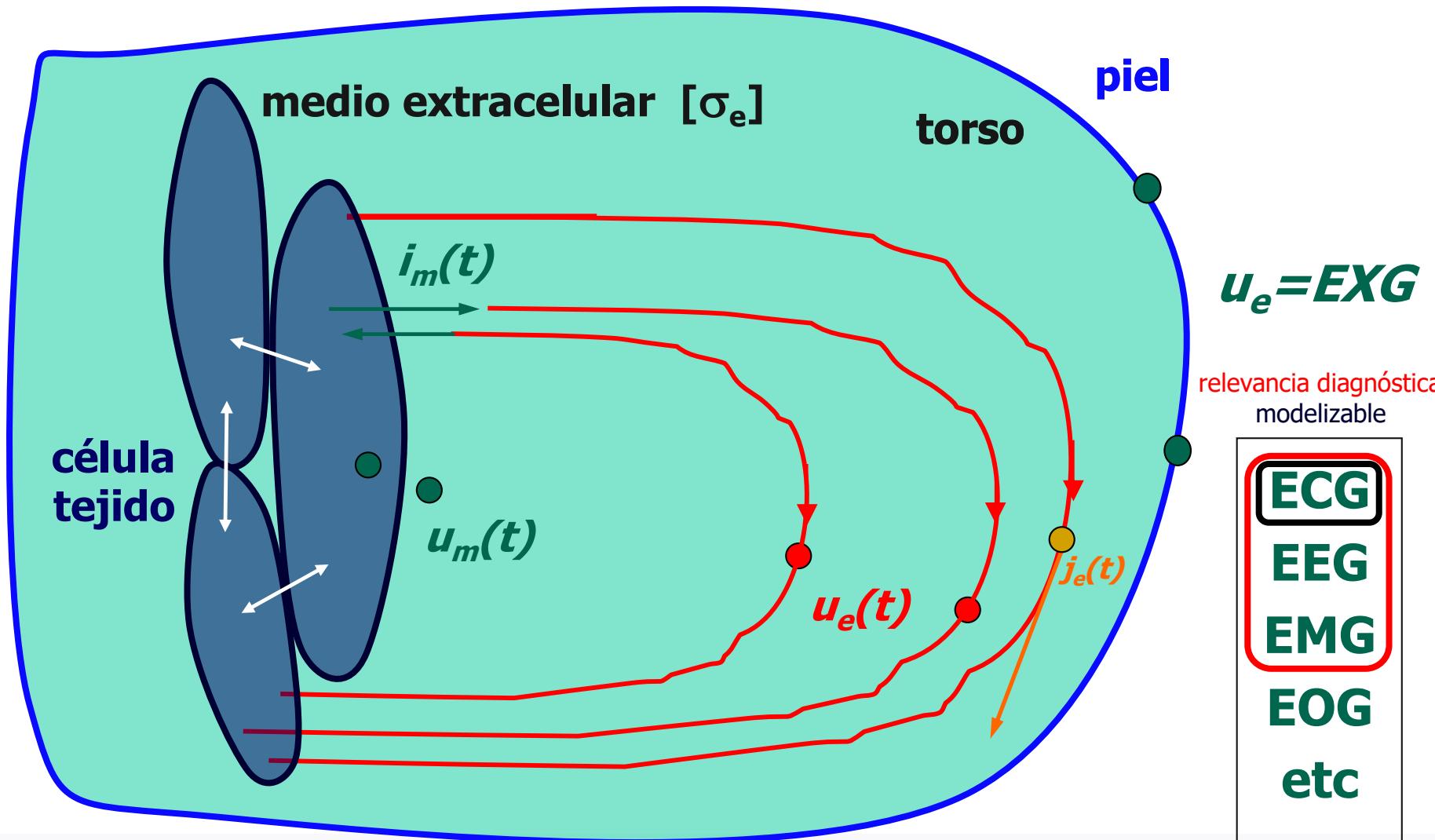
Canal iónico



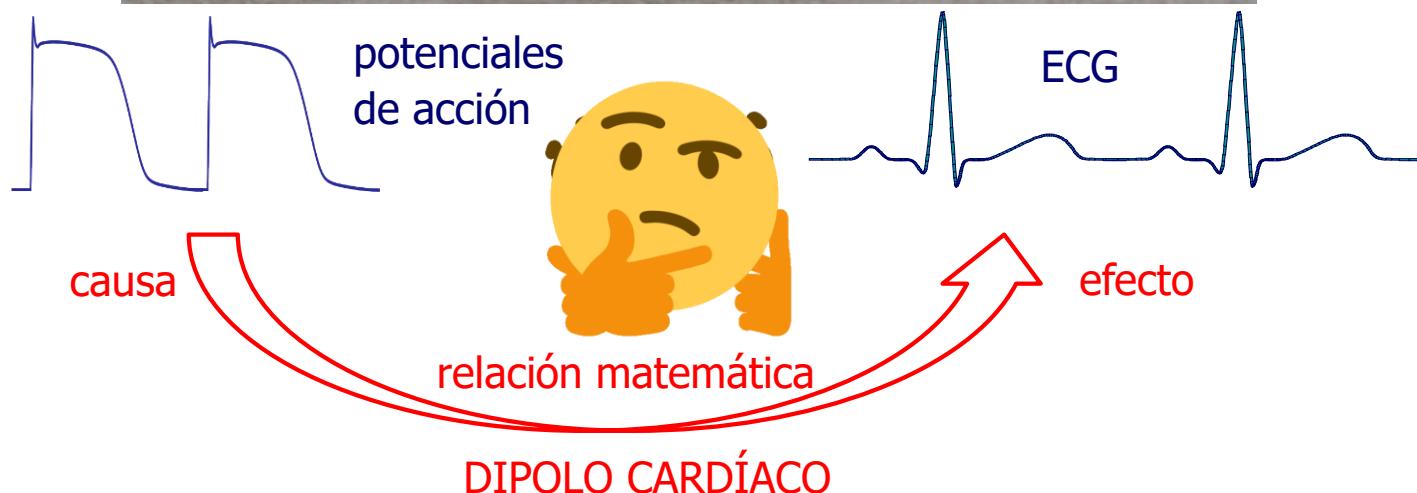
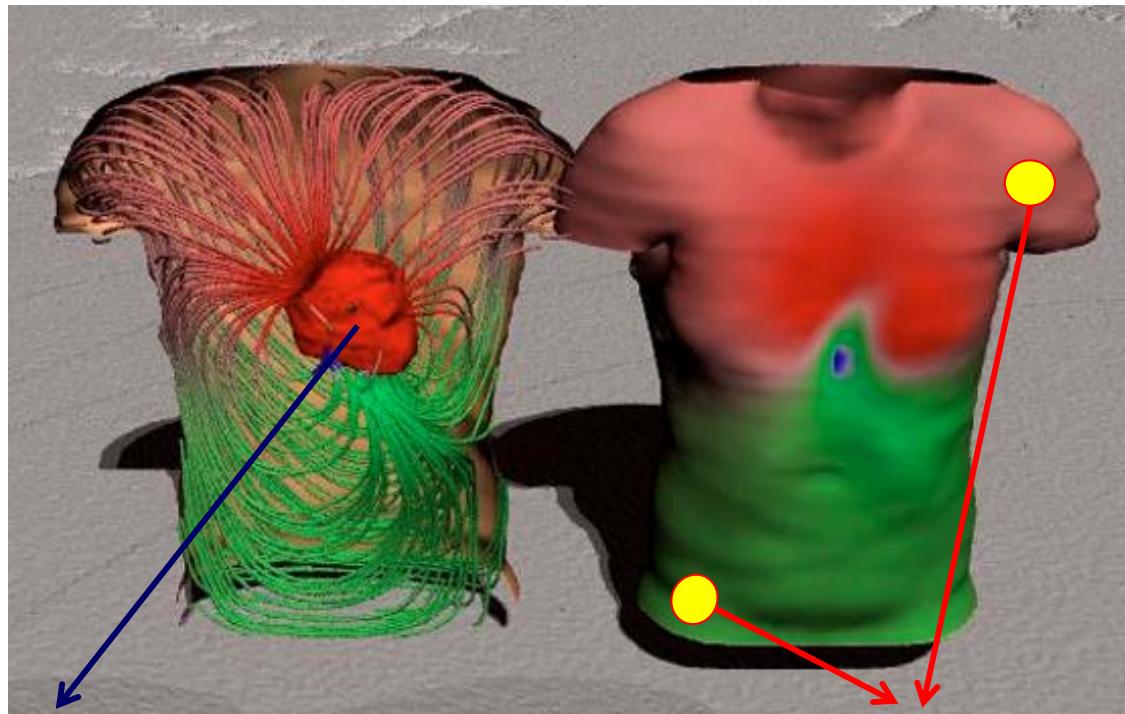
Gen



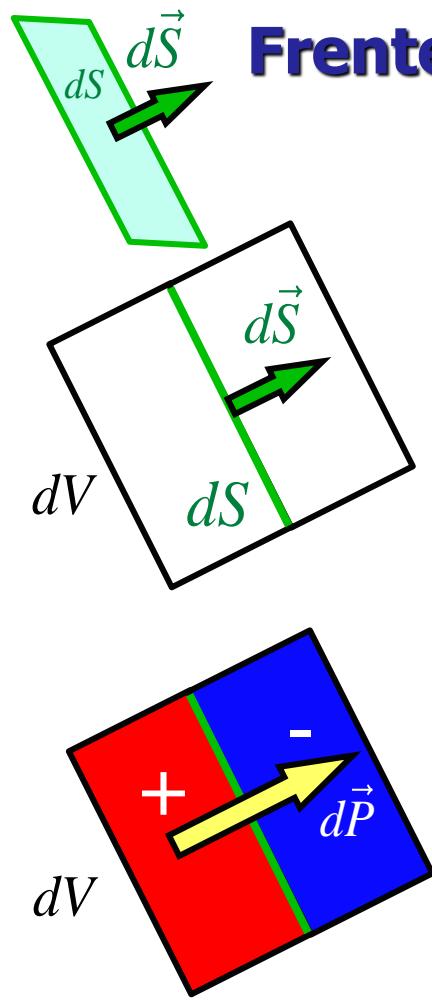
¿Qué son los potenciales extracelulares?



Relación ECG – potenciales de acción miocárdicos



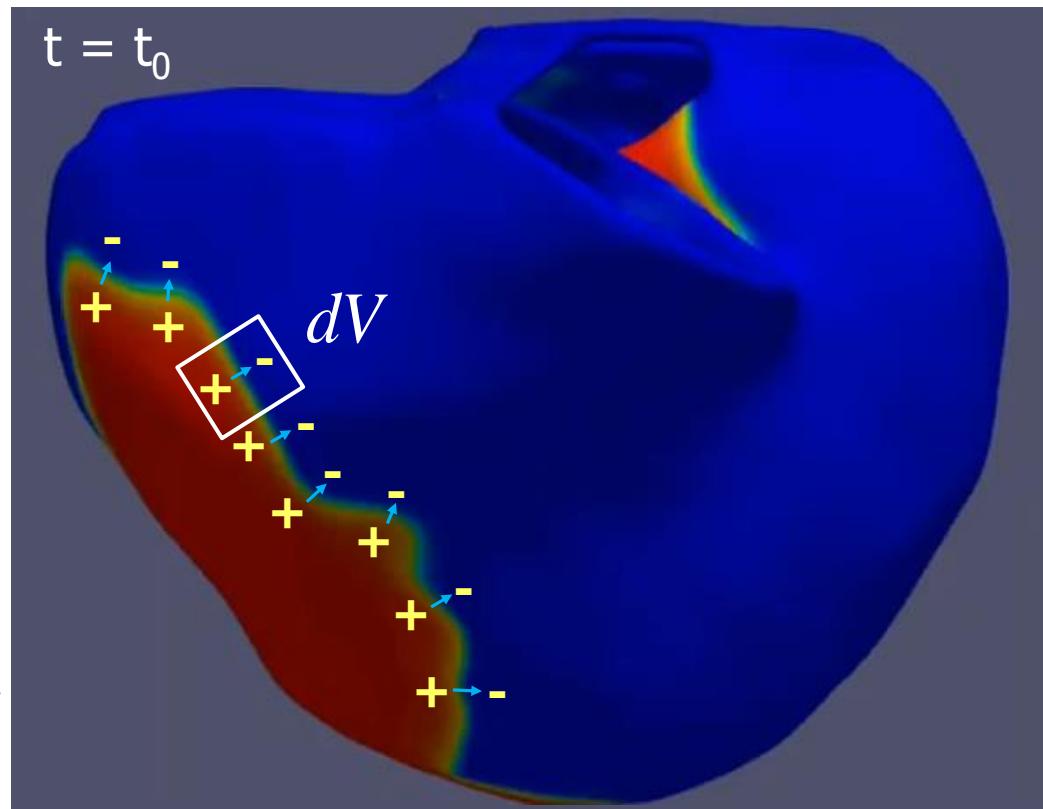
Frentes de onda eléctricos en los ventrículos



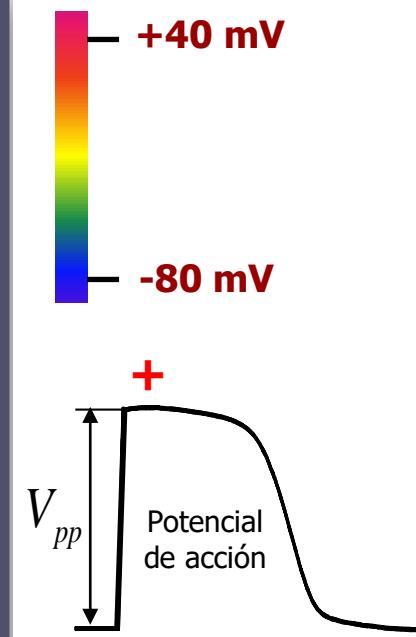
Dipolo eléctrico infinitesimal

$d\vec{P}$: MOMENTO DIPOLAR
(magnitud del dipolo)

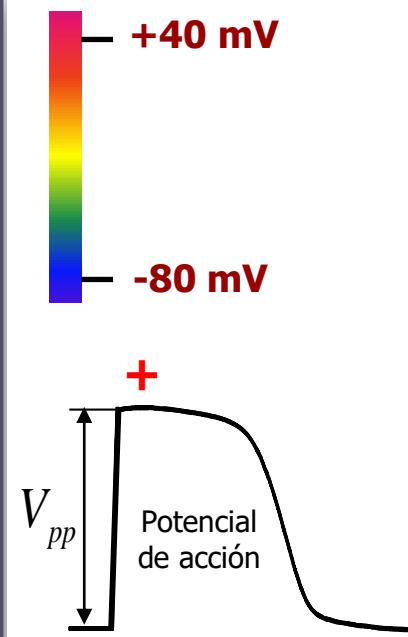
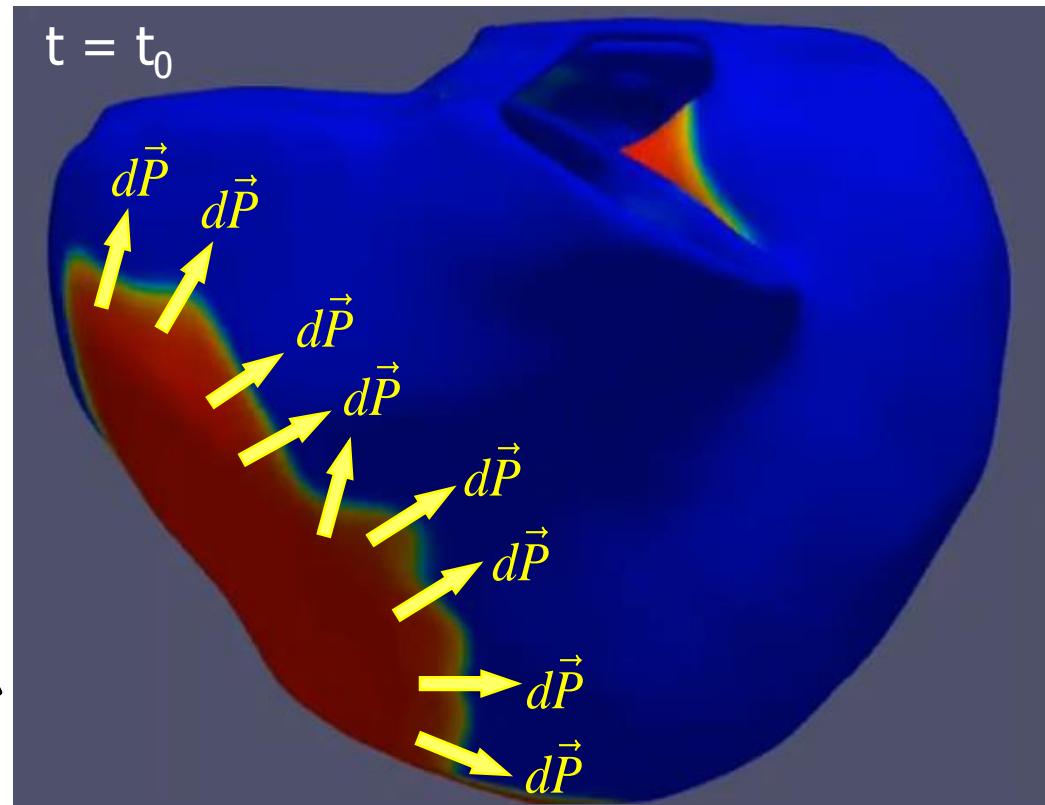
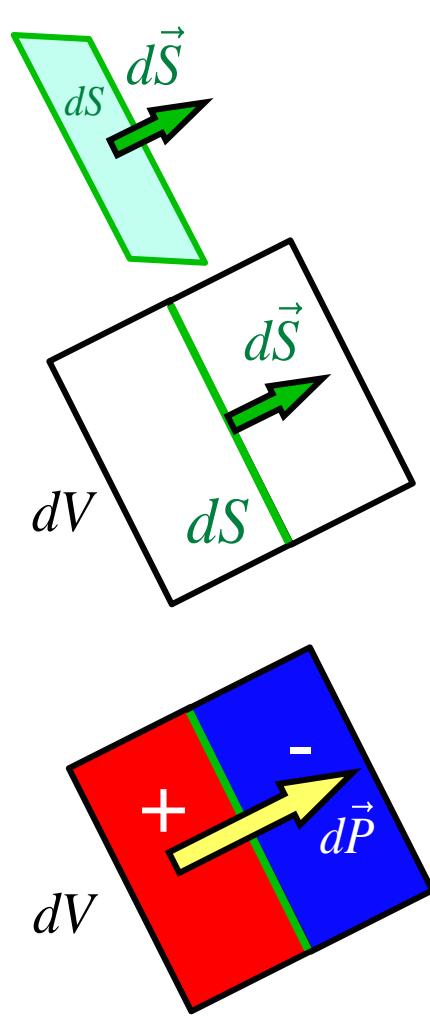
$$d\vec{P} = \gamma \sigma_i V_{pp} d\vec{S}$$



→ Corrientes despolarizantes que viajan asociados al frente de onda

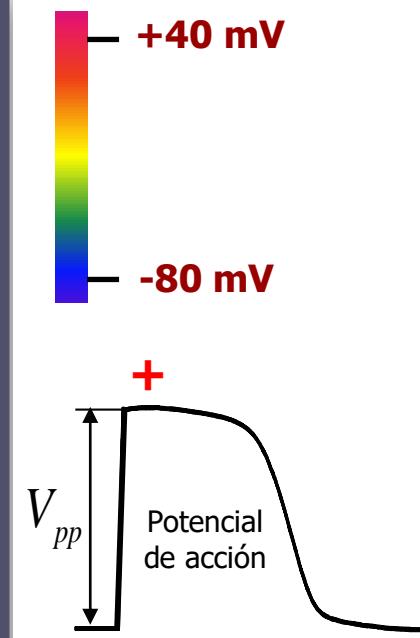
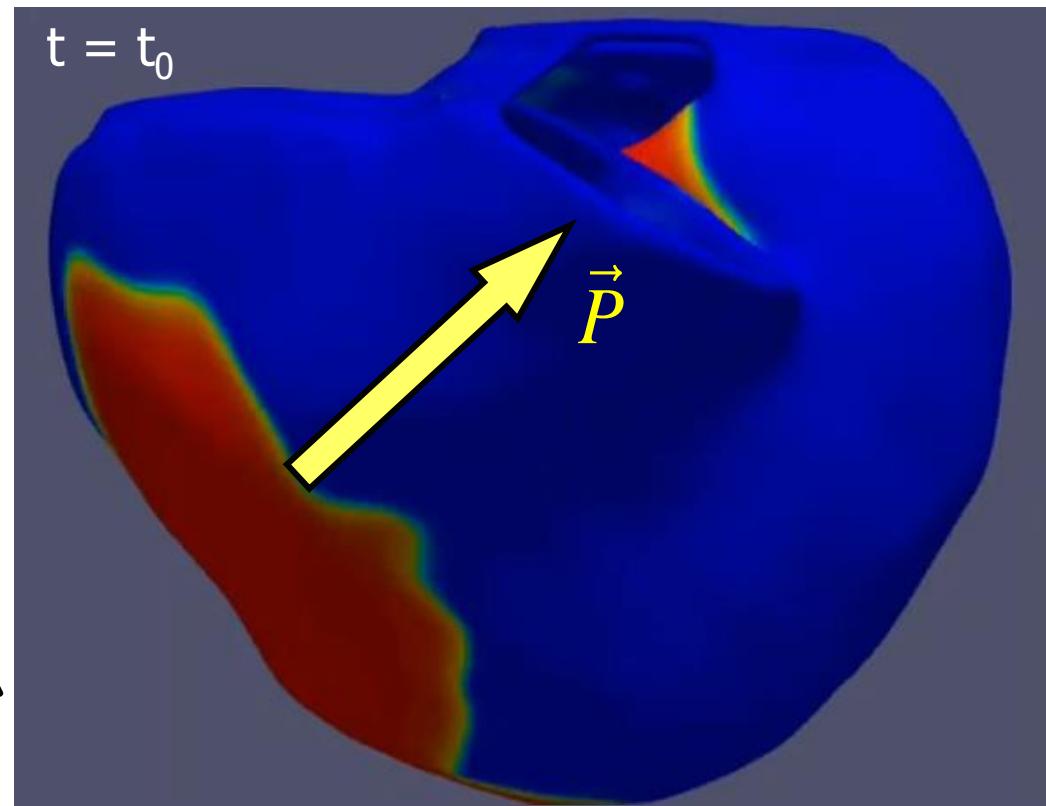
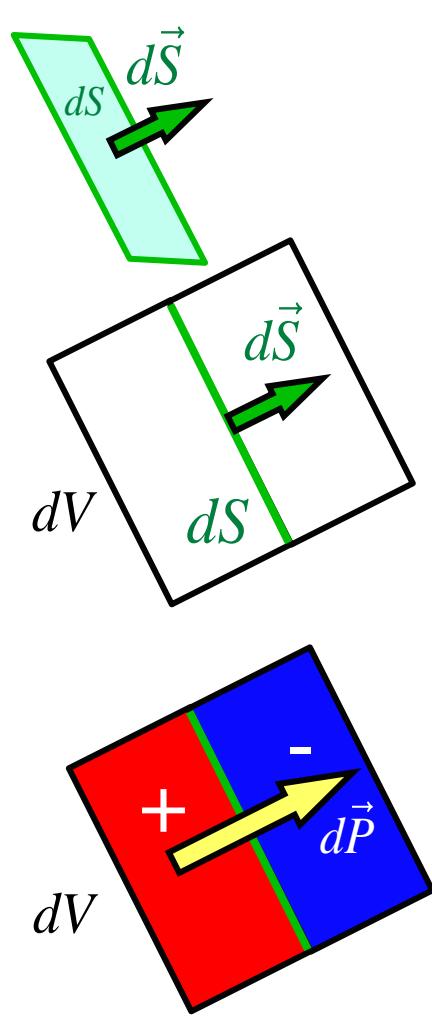


Cada frente de onda es una distribución de dipolos infinitesimales



$$d\vec{P} = \gamma \sigma_i V_{pp} d\vec{S}$$

Cada frente de onda es una distribución de dipolos infinitesimales

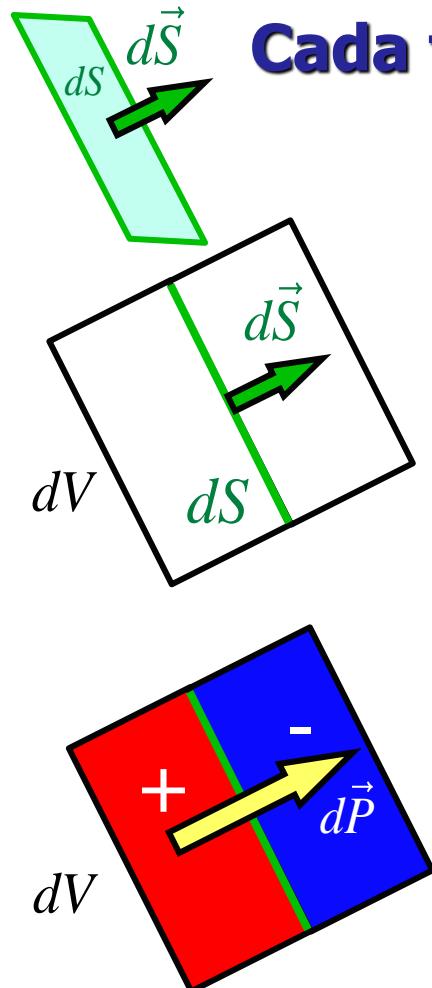


Dipolo eléctrico infinitesimal

$d\vec{P}$: MOMENTO DIPOLAR
(magnitud del dipolo)

$$d\vec{P} = \gamma \sigma_i V_{pp} d\vec{S}$$

Cada frente de onda equivale a un dipolo eléctrico



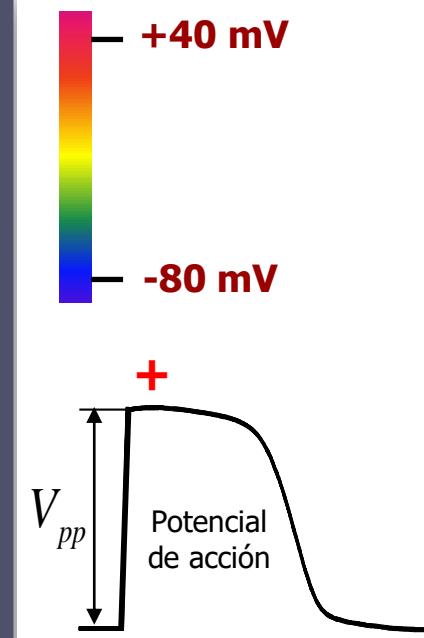
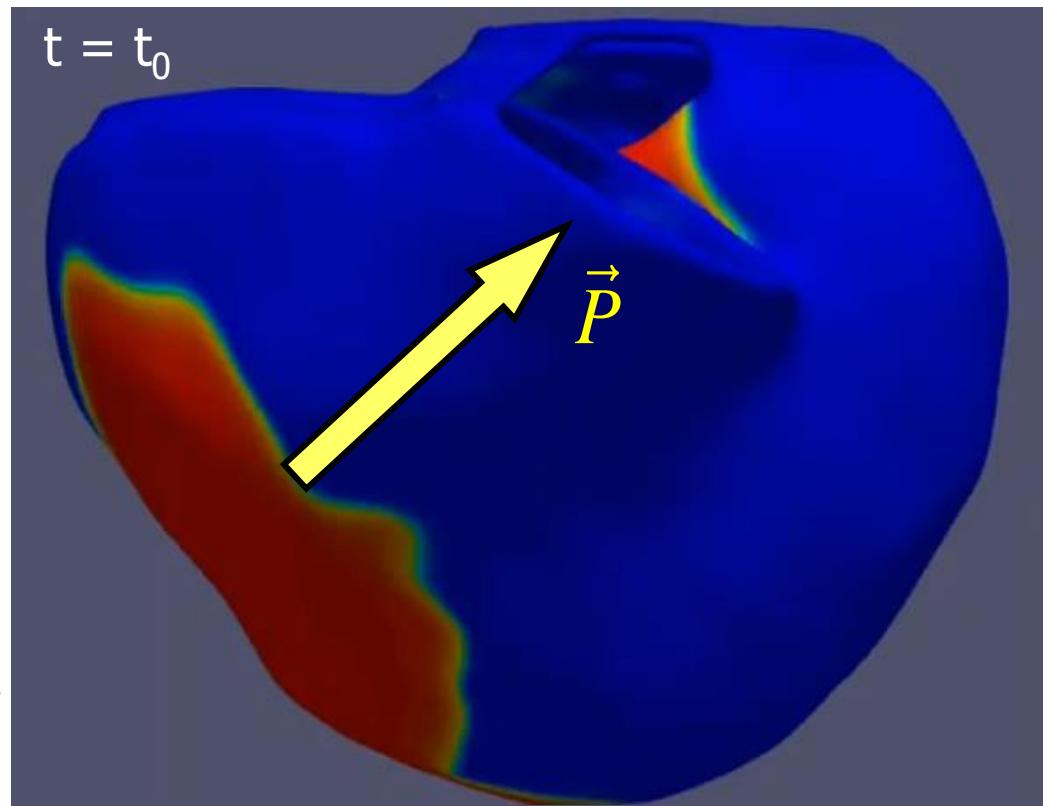
Dipolo eléctrico infinitesimal

$d\vec{P}$: MOMENTO DIPOLAR
(magnitud del dipolo)

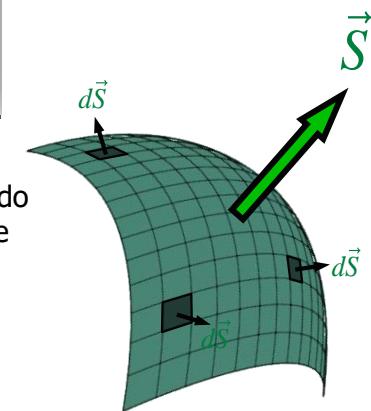
$$d\vec{P} = \gamma \sigma_i V_{pp} d\vec{S}$$

$$\text{DIPOLO CARDÍACO} \quad \vec{P} = \int d\vec{P}$$

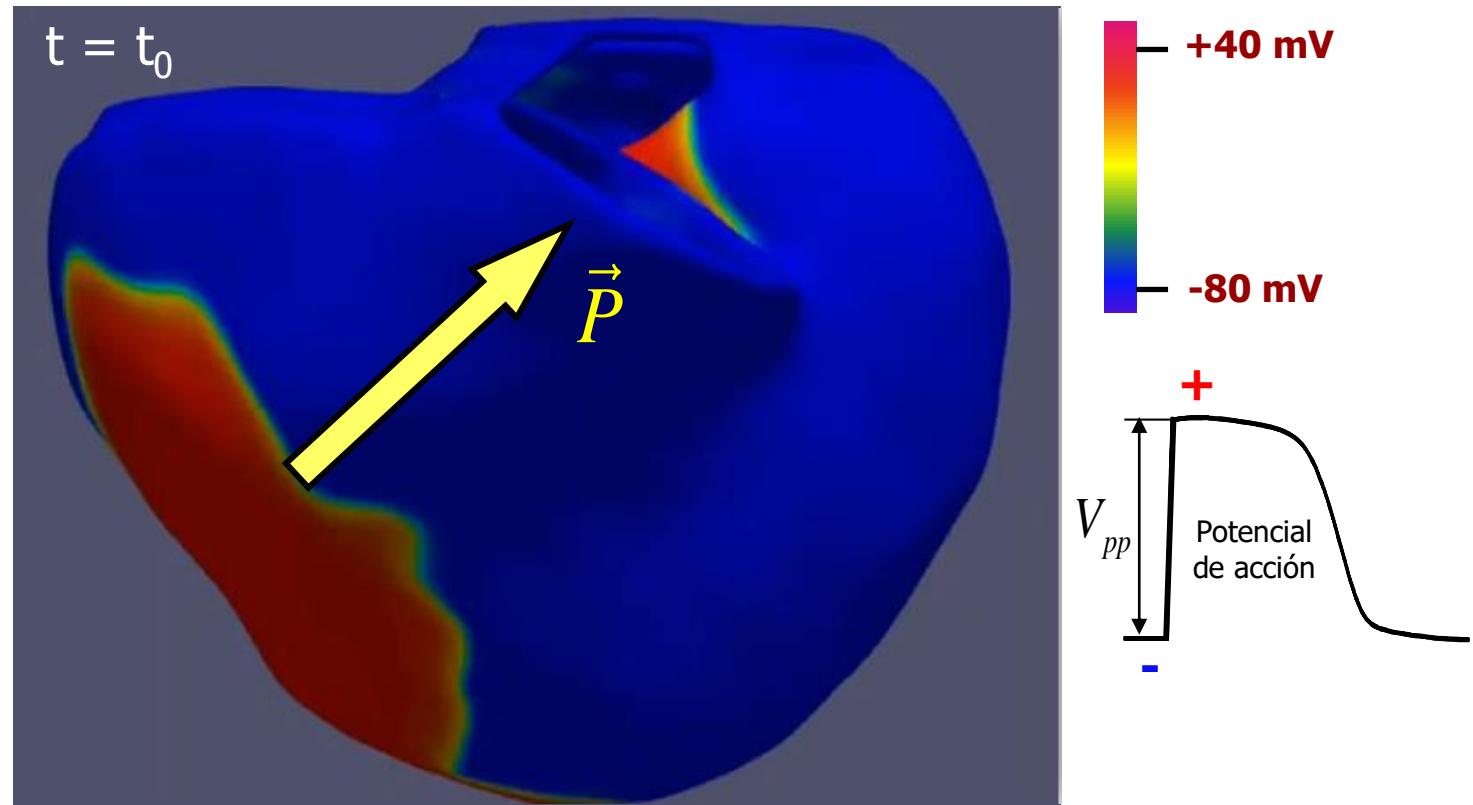
$$\vec{P} = \int \gamma \sigma_i V_{pp} d\vec{S} = \gamma \sigma_i V_{pp} \int d\vec{S} = \gamma \sigma_i V_{pp} \vec{S}$$



Dipolo asociado
a un frente de onda (3D)



El dipolo cardíaco



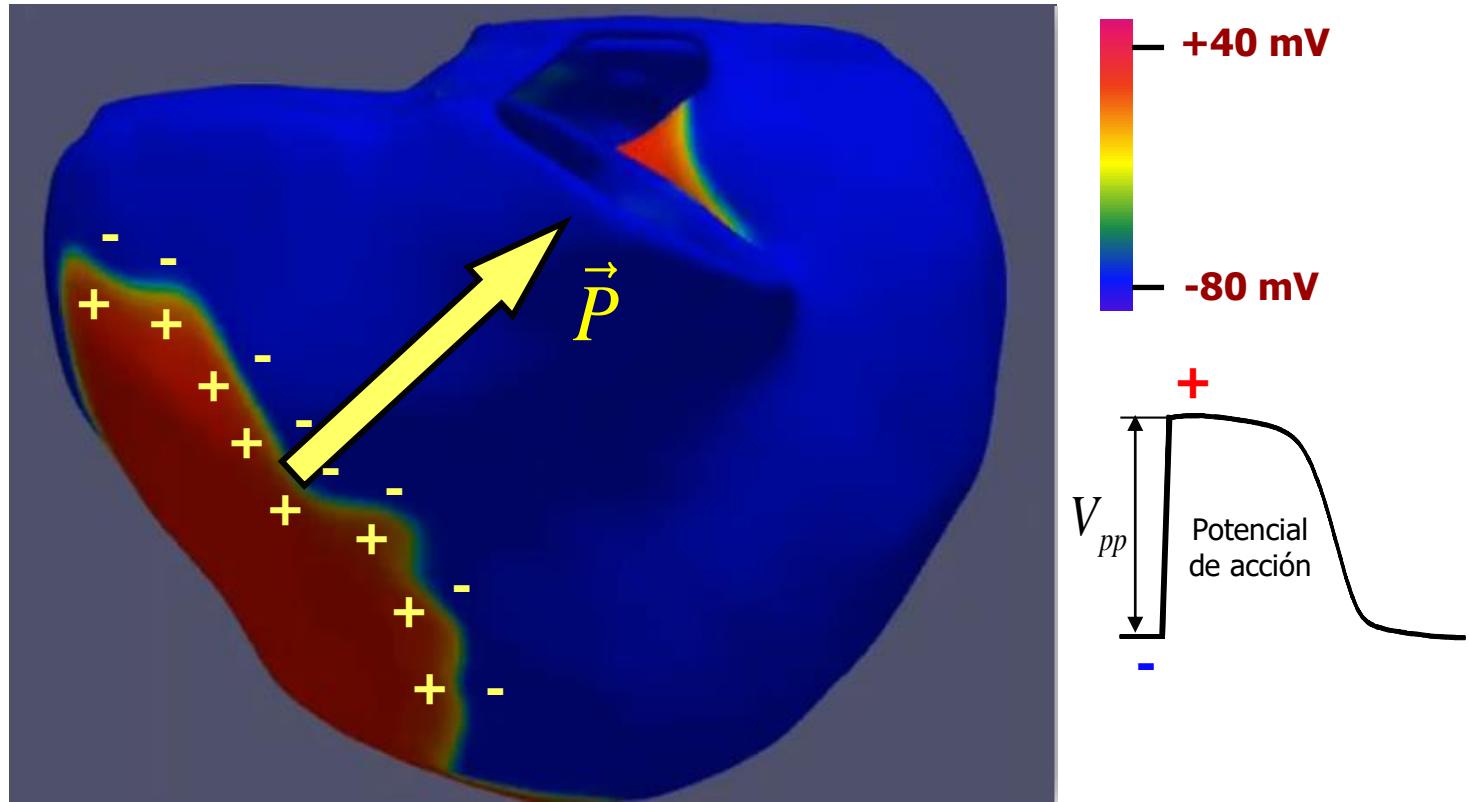
DIPOLO CARDÍACO

$$\vec{P} = \gamma \sigma_i V_{pp} \vec{S}$$

Dipolo asociado
a un frente de
onda (3D)

$$\vec{P} = \int \gamma \sigma_i V_{pp} d\vec{S} = \gamma \sigma_i V_{pp} \int d\vec{S} = \gamma \sigma_i V_{pp} \vec{S}$$

El dipolo cardíaco



DIPOLO CARDÍACO

$$\vec{P}(t) = \gamma \sigma_i V_{pp} \vec{S}(t)$$

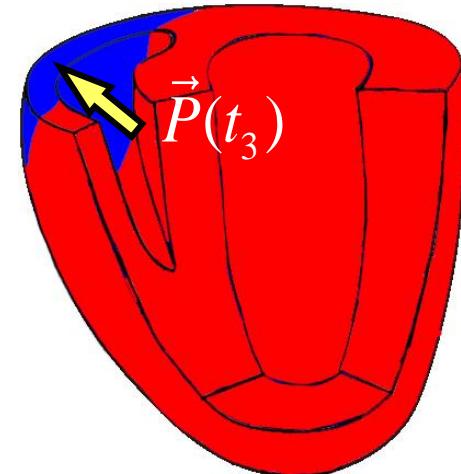
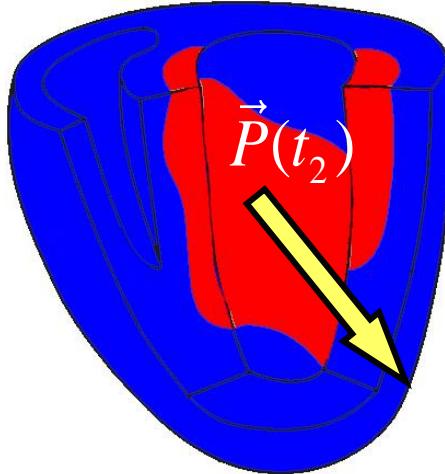
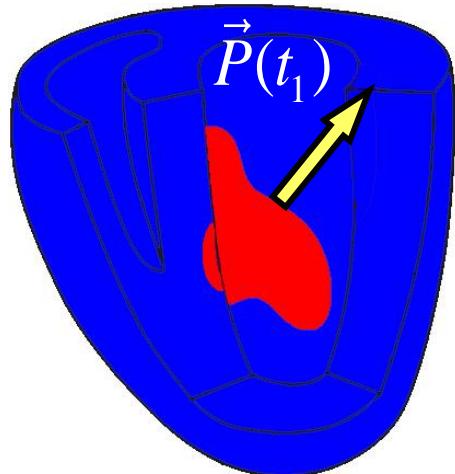
Dipolo asociado
a un frente de
onda (3D)

El dipolo cardíaco es dinámico

$t = t_1$

$t = t_2$

$t = t_3$



DIPOLO CARDÍACO

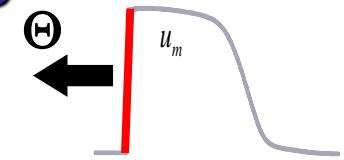
$$\vec{P}(t) = \gamma \sigma_i V_{pp} \vec{S}(t)$$

Dipolo asociado
a un frente de
onda (3D)

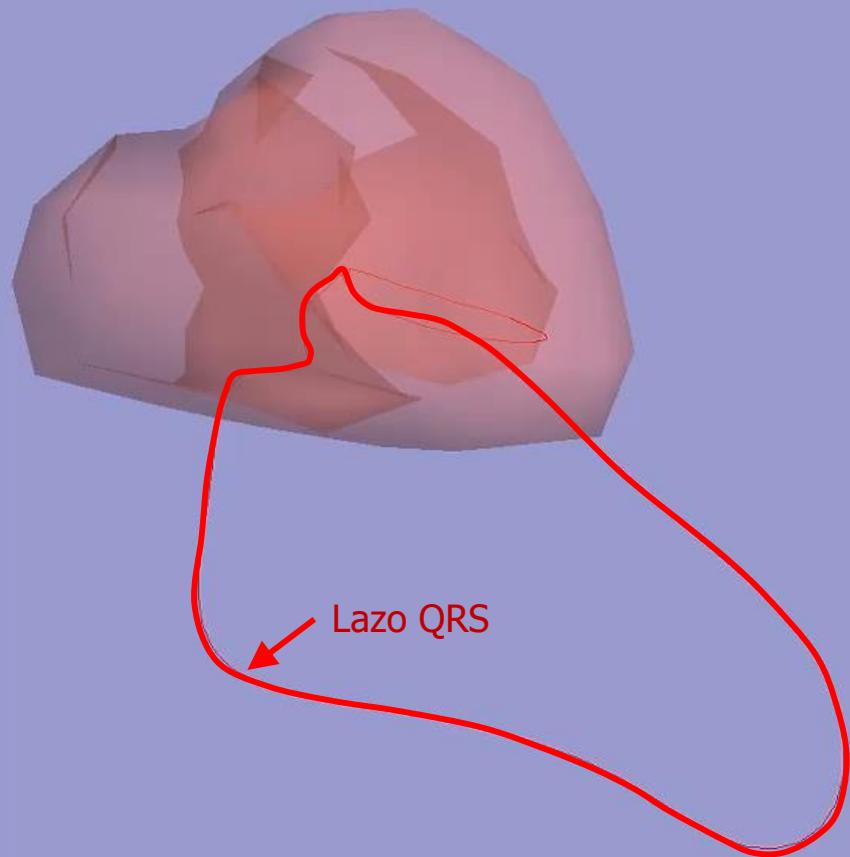
El dipolo cardíaco es dinámico

$$\vec{P}(t) = \gamma \sigma_i V_{pp} \vec{S}(t)$$

DIPOLO CARDÍACO



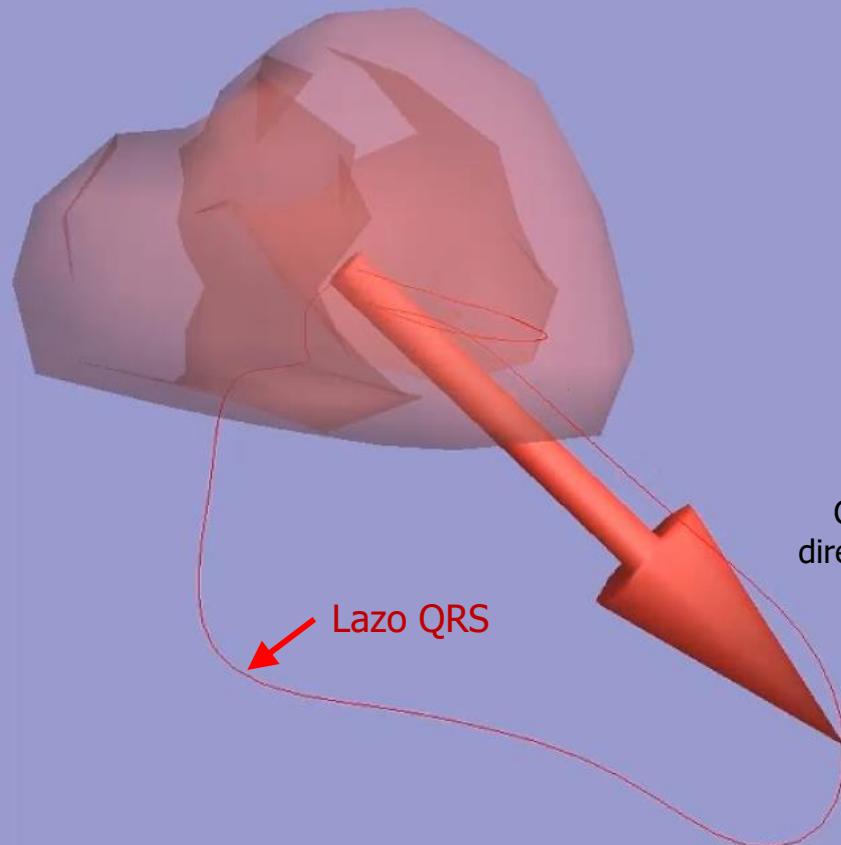
Evolución del dipolo cardíaco durante la DESPOLARIZACIÓN



El dipolo cardíaco es dinámico

$$\vec{P}(t) = \gamma \sigma_i V_{pp} \vec{S}(t)$$

DIPOLO CARDÍACO

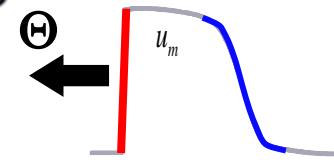


Cuando el dipolo cardiaco tiene su máximo módulo, su dirección coincide aproximadamente con el eje del corazón.

El dipolo cardíaco es dinámico

$$\vec{P}(t) = \gamma \sigma_i V_{pp} \vec{S}(t)$$

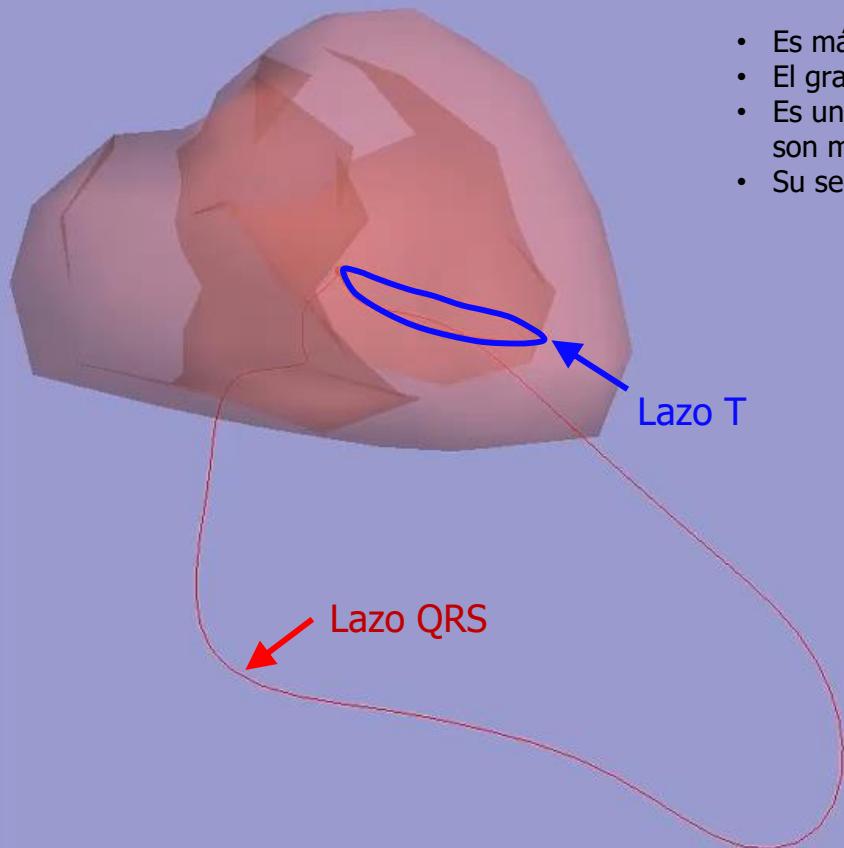
DIPOLO CARDÍACO



¿Y qué ocurre durante la REPOLARIZACIÓN?

La repolarización

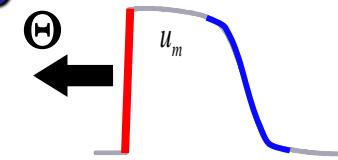
- Es más lenta que la despolarización
- El gradiente de potencial es menor
- Es un proceso más "volumétrico" (las superficies de los frentes de onda son menores)
- Su secuencia es diferente a la de despolarización (EPI → ENDO)



El dipolo cardíaco es dinámico

$$\vec{P}(t) = \gamma \sigma_i V_{pp} \vec{S}(t)$$

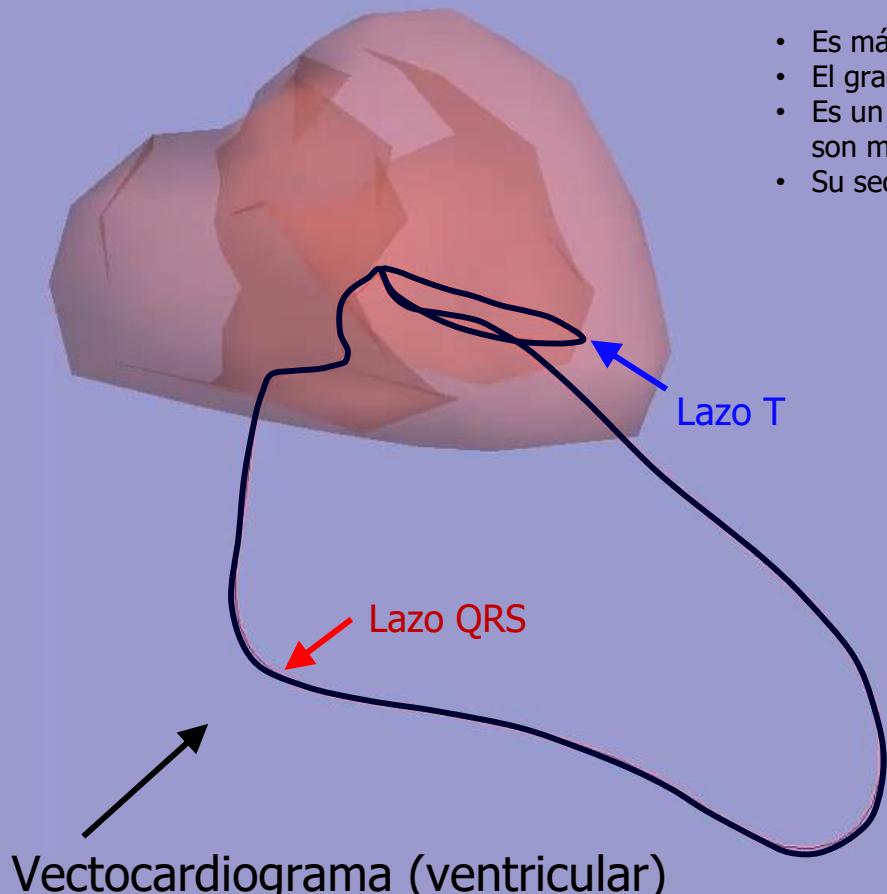
DIPOLO CARDÍACO



¿Y qué ocurre durante la REPOLARIZACIÓN?

La repolarización

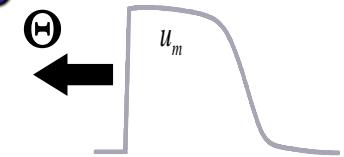
- Es más lenta que la despolarización
- El gradiente de potencial es menor
- Es un proceso más "volumétrico" (las superficies de los frentes de onda son menores)
- Su secuencia es diferente a la de despolarización (EPI → ENDO)



El dipolo cardíaco es dinámico

$$\vec{P}(t) = \gamma \sigma_i V_{pp} \vec{S}(t)$$

DIPOLO CARDÍACO

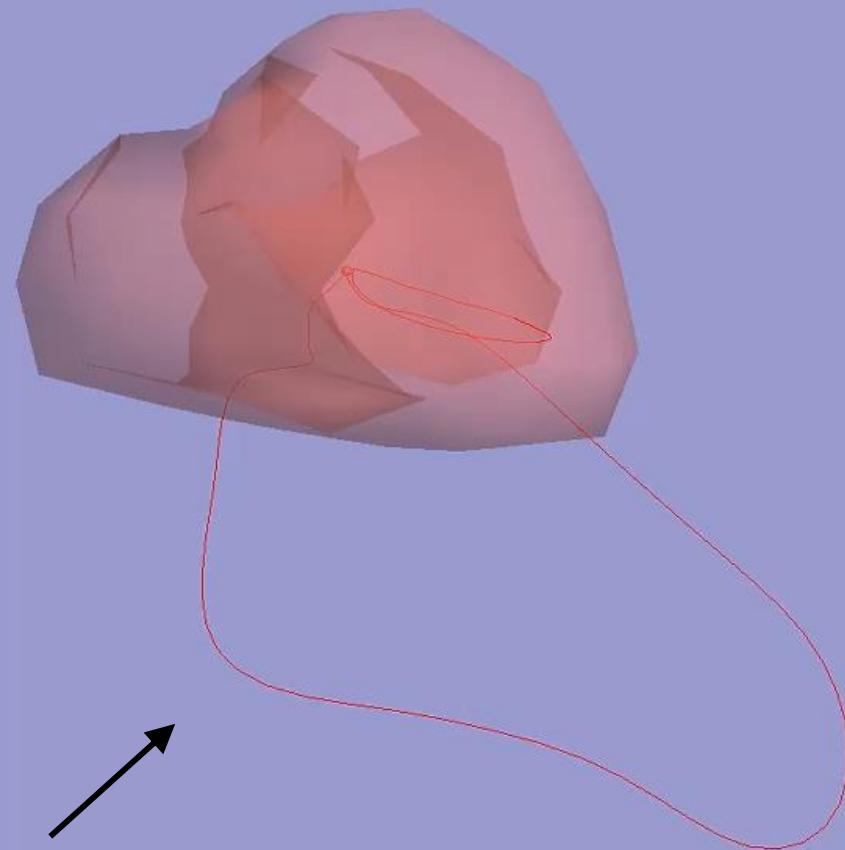


Durante todo el ciclo cardíaco

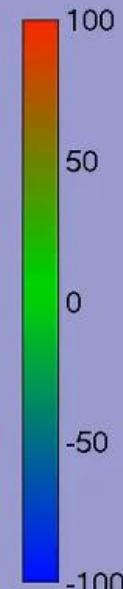
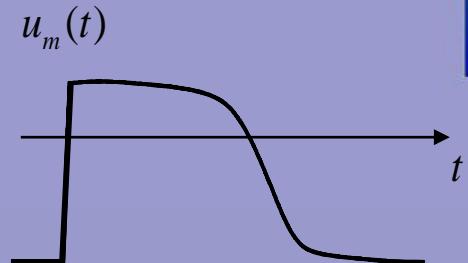
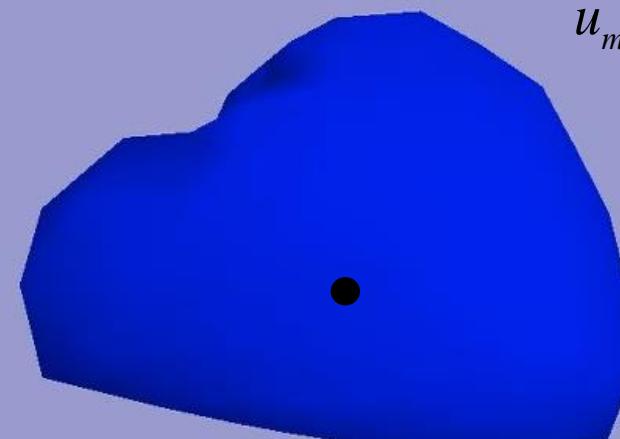
DIPOLO CARDÍACO

(efecto) ← (causa)

POTENCIAL DE MEMBRANA



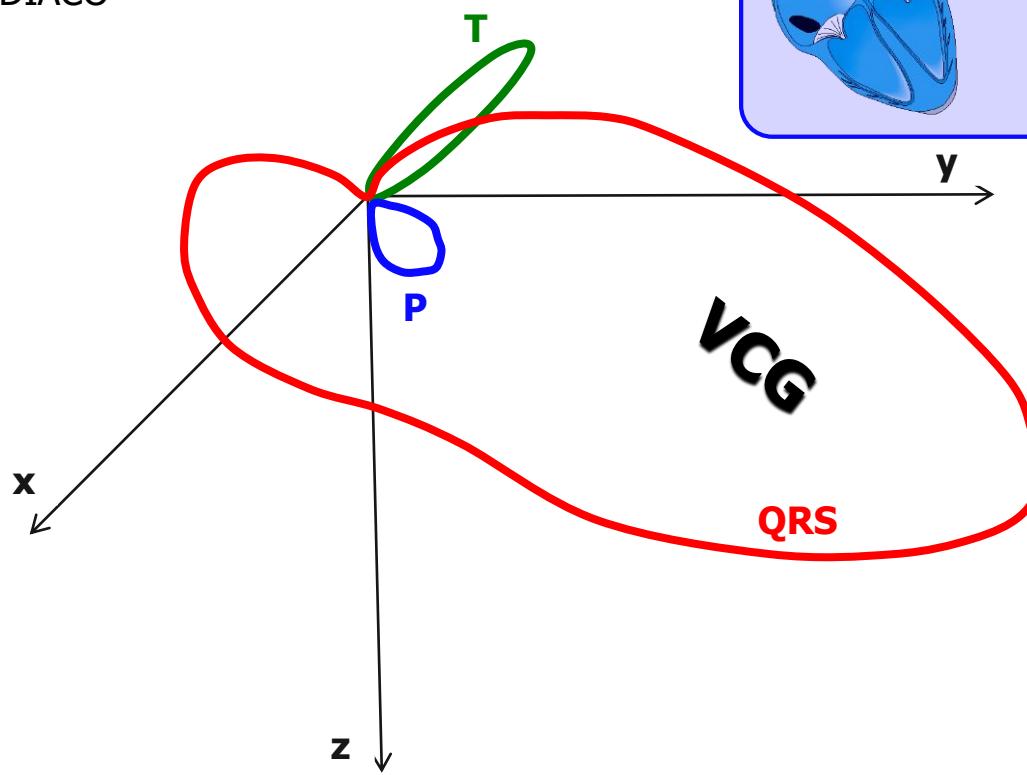
Vectocardiograma (ventricular)



El Vectocardiograma (VCG)

$$\vec{P}(t) = \gamma \sigma_i V_{pp} \vec{S}(t)$$

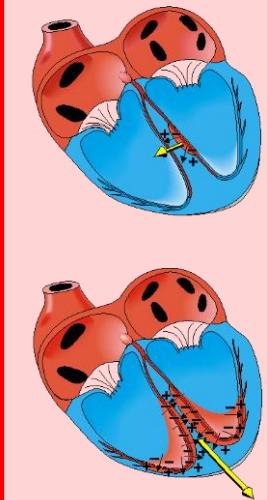
DIPOLO CARDÍACO



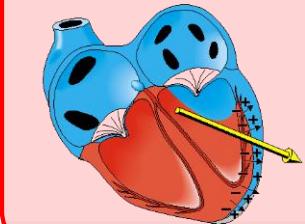
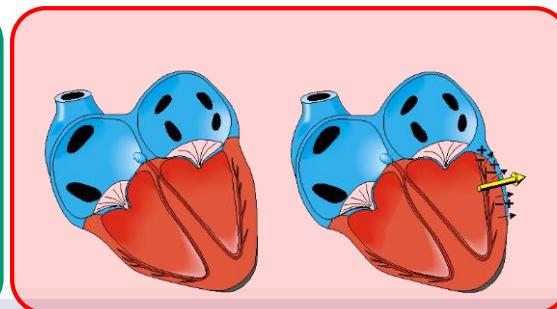
Despolarización auricular



Despolarización ventricular



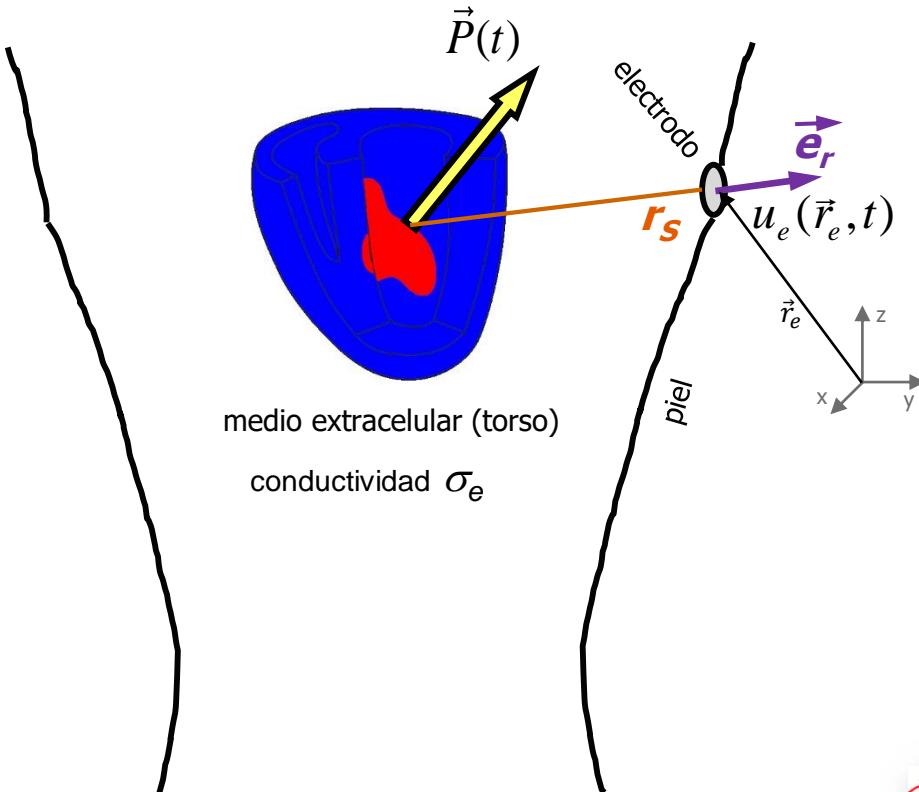
Repolarización ventricular



Potencial generado por un dipolo

$$\vec{P}(t) = \gamma \sigma_i V_{pp} \vec{S}(t)$$

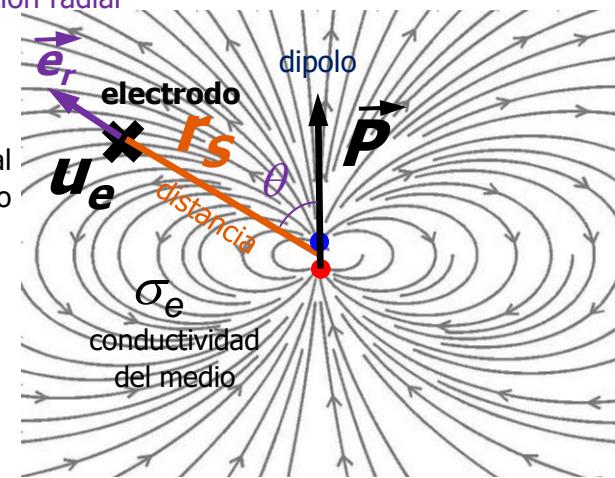
DIPOLO CARDÍACO



vector unitario
en dirección radial

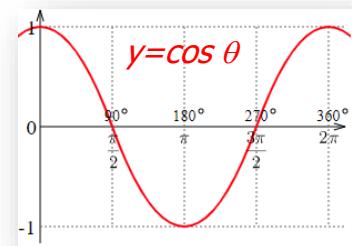
potencial
eléctrico

líneas de corriente



¿De qué depende el
valor del potencial u_e ?

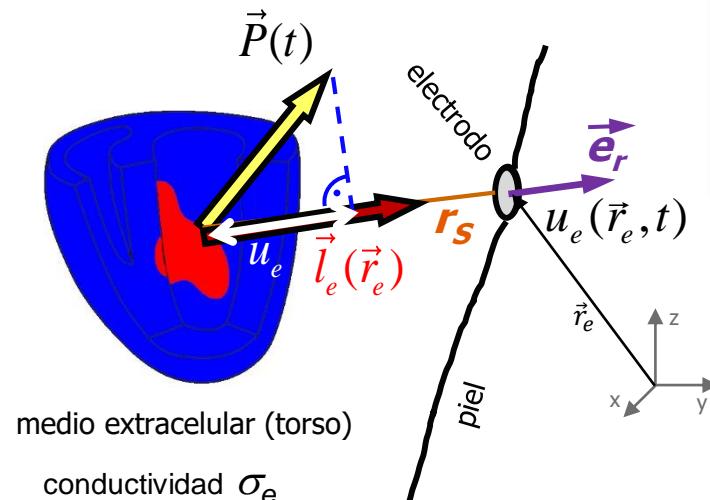
$$u_e = f(r_s, \theta, P, \sigma_e)$$



Potencial generado por el dipolo cardíaco

$$\vec{P}(t) = \gamma \sigma_i V_{pp} \vec{S}(t)$$

DIPOLO CARDÍACO



medio extracelular (torso)
conductividad σ_e

- \vec{P} no depende de la posición del electrodo (solo del tiempo)
- \vec{l}_e sí depende de la posición (\vec{r}_e) del electrodo

El ECG unipolar es proporcional a la proyección del dipolo cardíaco sobre el vector electrocardiográfico

$$u_e(\vec{r}_e, t) = \vec{P}(t) \cdot \vec{l}_e(\vec{r}_e)$$

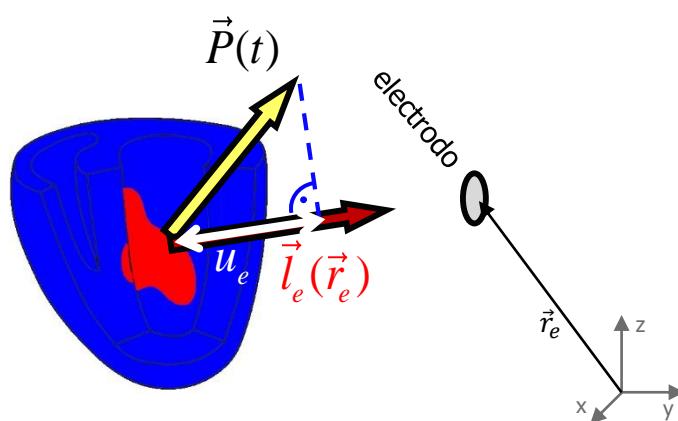
$$u_e = \frac{\vec{P} \cdot \vec{e}_r}{4\pi\sigma_e r_s^2} \quad (\text{vector electrocardiográfico})$$
$$\vec{l}_e = \frac{\vec{e}_r}{4\pi\sigma_e r_s^2}$$

- La dirección del vector electrocardiográfico es la de la recta que une el punto de medida con el centro de gravedad del corazón (aproximación)
- El sentido del vector electrocardiográfico es desde el corazón hacia el punto de medida
- El módulo del vector electrocardiográfico es tanto mayor cuanto más cerca esté el punto de medida del corazón (ley del cuadrado de la distancia).

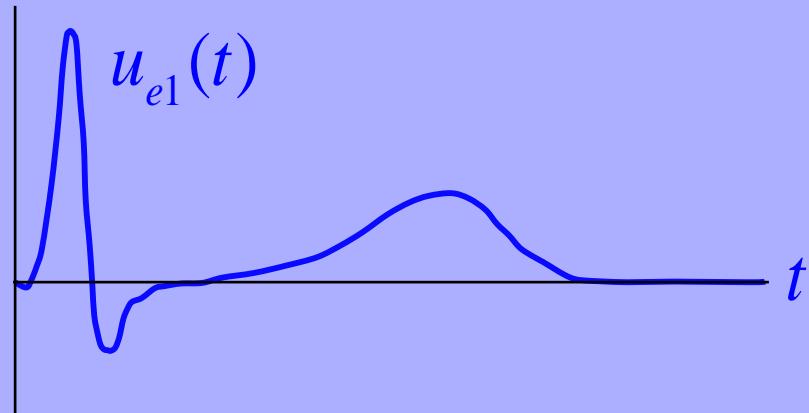
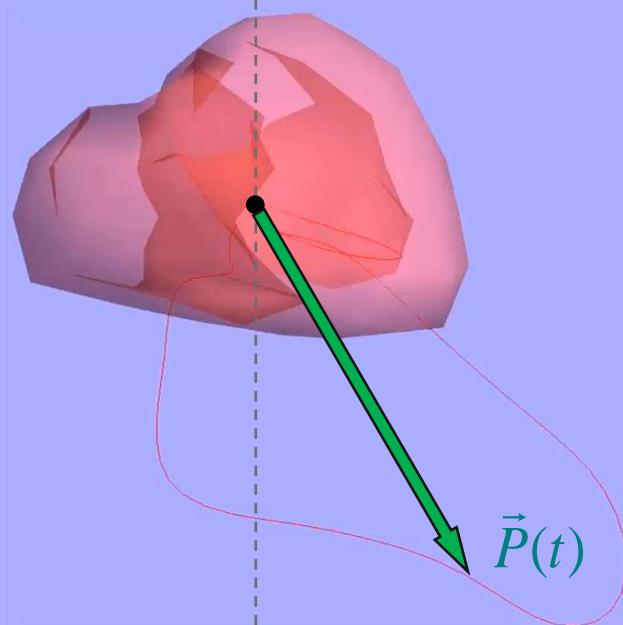
Cálculo del ECG

$$u_e(\vec{r}_e, t) = \vec{P}(t) \cdot \vec{l}_e(\vec{r}_e)$$

El ECG unipolar es proporcional a la proyección del dipolo cardíaco sobre el vector electrocardiográfico



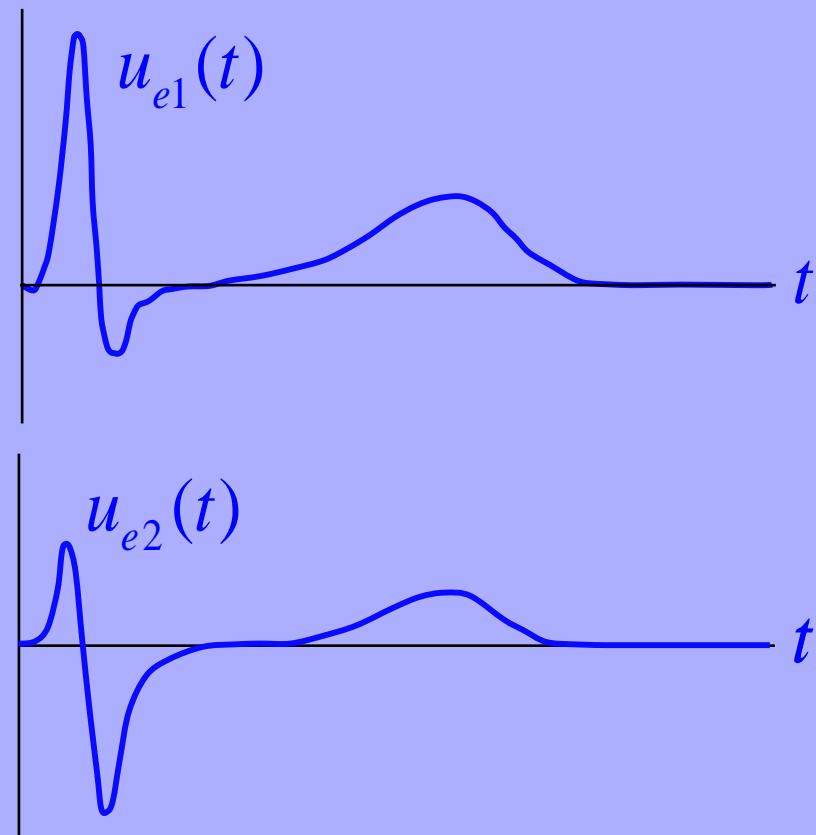
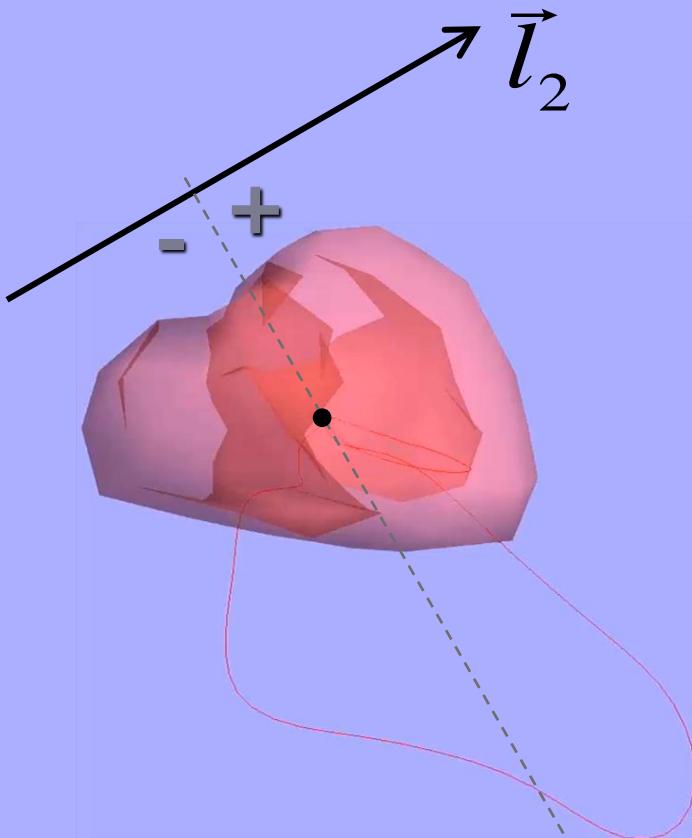
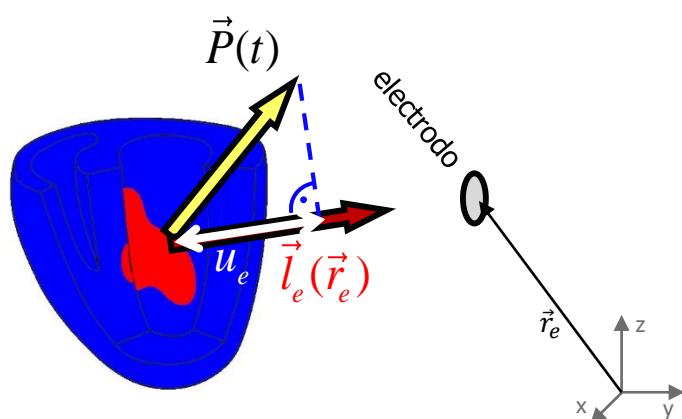
$$\rightarrow \vec{l}_1$$



Cálculo del ECG

$$u_e(\vec{r}_e, t) = \vec{P}(t) \cdot \vec{l}(\vec{r}_e)$$

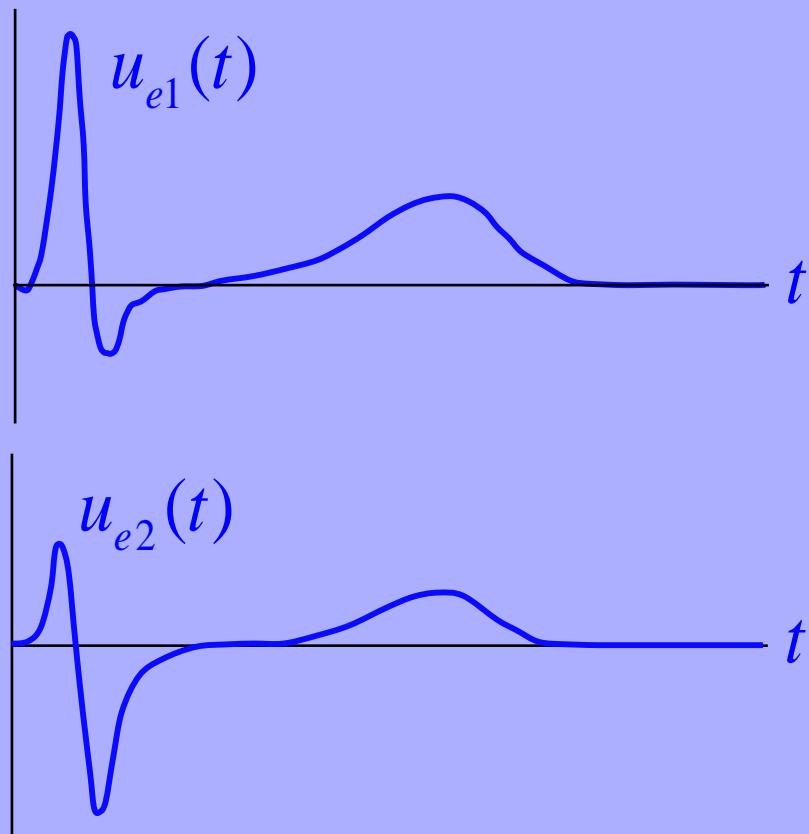
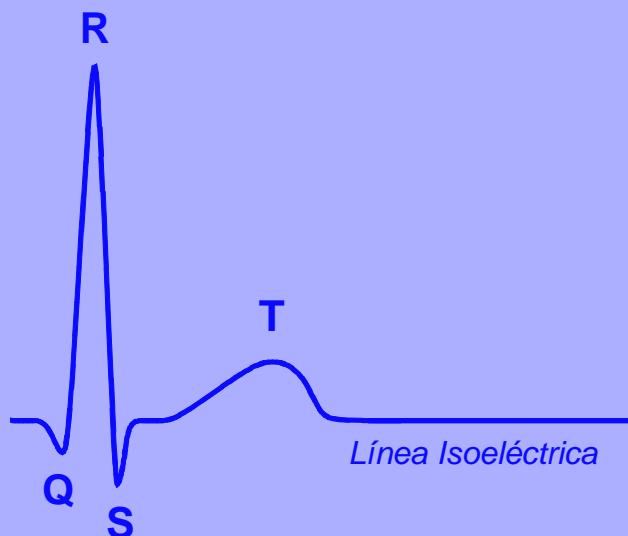
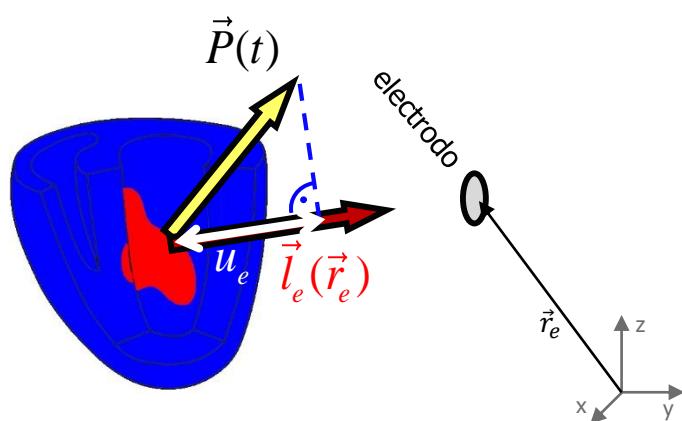
El ECG unipolar es proporcional a la proyección del dipolo cardíaco sobre el vector electrocardiográfico



Cálculo del ECG

$$u_e(\vec{r}_e, t) = \vec{P}(t) \cdot \vec{l}(\vec{r}_e)$$

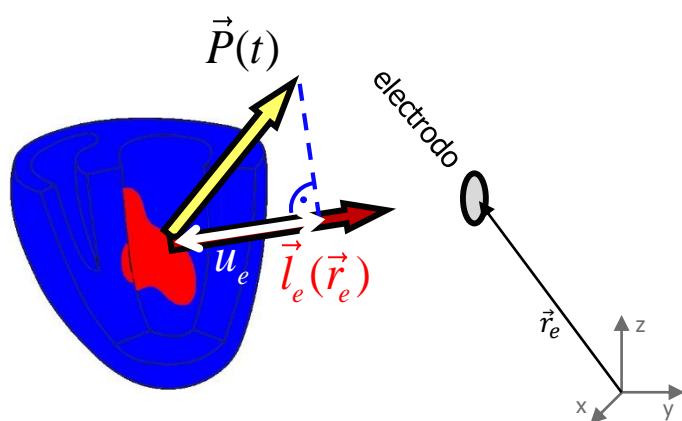
El ECG unipolar es proporcional a la proyección del dipolo cardíaco sobre el vector electrocardiográfico



Cálculo del ECG

$$u_e(\vec{r}_e, t) = \vec{P}(t) \cdot \vec{l}(\vec{r}_e)$$

El ECG unipolar es proporcional a la proyección del dipolo cardíaco sobre el vector electrocardiográfico



PERO... el ECG se registra siempre con DOS electrodos
(no es una señal unipolar, sino bipolar)

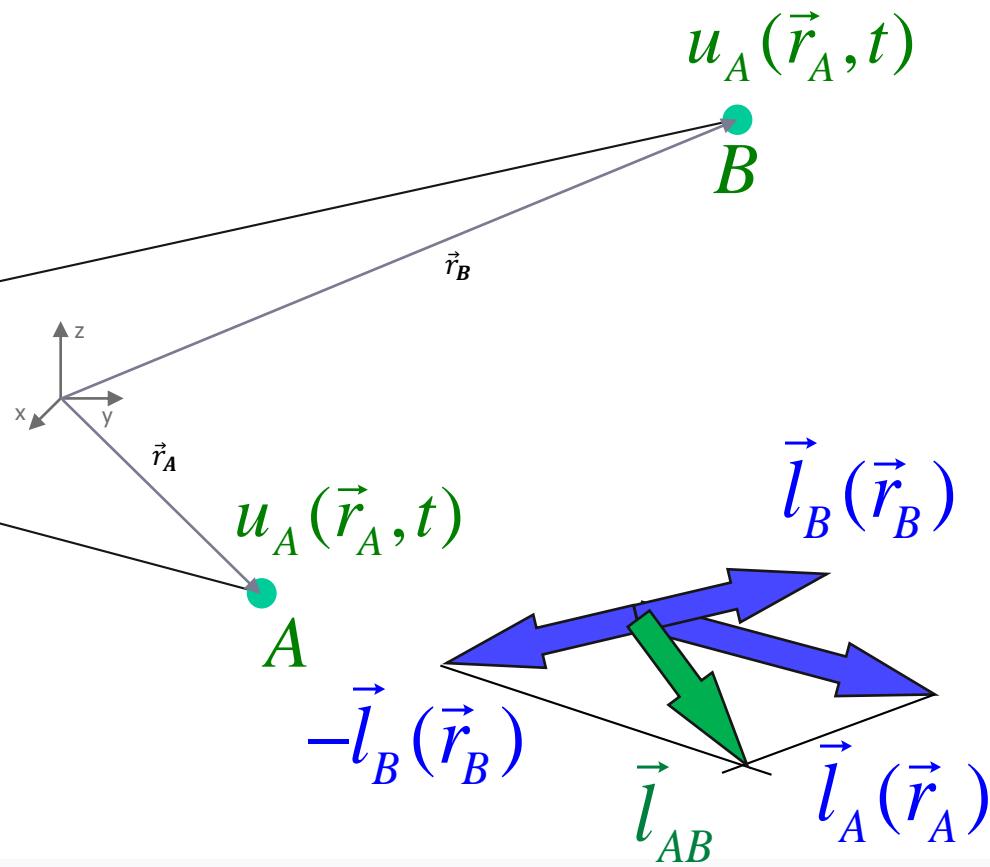
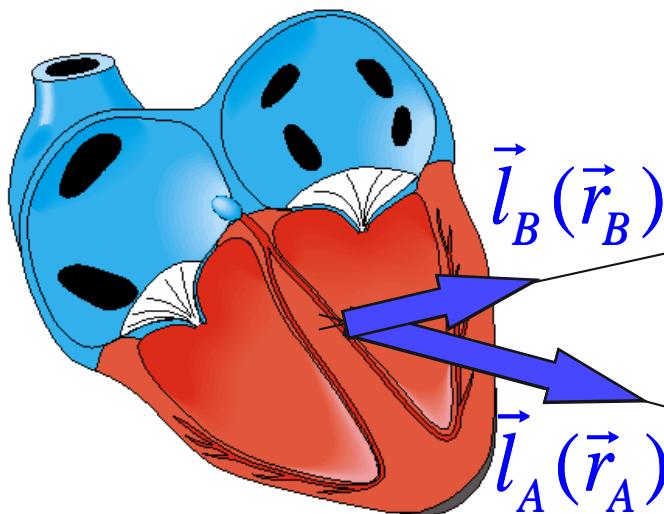
ECG_(AB)

$$V_{AB}(t) = u_A - u_B = \vec{P}(t) \cdot \vec{l}_A(\vec{r}_A) - \vec{P}(t) \cdot \vec{l}_B(\vec{r}_B) = \vec{P}(t) \cdot [\vec{l}_A(\vec{r}_A) - \vec{l}_B(\vec{r}_B)]$$

$$u_e(\vec{r}_e, t) = \vec{P}(t) \cdot \vec{l}(\vec{r}_e)$$

$$\vec{l}_{AB} = \vec{l}_A(\vec{r}_A) - \vec{l}_B(\vec{r}_B)$$

Vector de la derivación AB

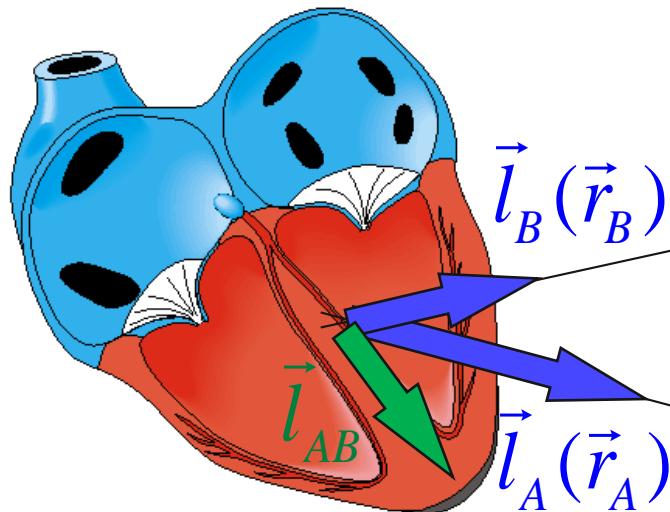


Vector de Derivación

$$V_{AB}(t) = u_A - u_B = \vec{P}(t) \cdot \vec{l}_A(\vec{r}_A) - \vec{P}(t) \cdot \vec{l}_B(\vec{r}_B) = \vec{P}(t) \cdot [\vec{l}_A(\vec{r}_A) - \vec{l}_B(\vec{r}_B)] = \vec{P}(t) \cdot \vec{l}_{AB}$$

$$\vec{l}_{AB} = \vec{l}_A(\vec{r}_A) - \vec{l}_B(\vec{r}_B)$$

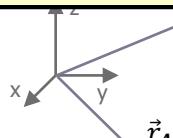
Vector de la derivación AB



$$V_{AB} = \vec{P}(t) \cdot \vec{l}_{AB}$$

ECG en la derivación AB

El ECG, medido entre los puntos A y B, es proporcional a la proyección del dipolo cardiaco sobre el vector de derivación AB



$$u_A(\vec{r}_A, t)$$

A

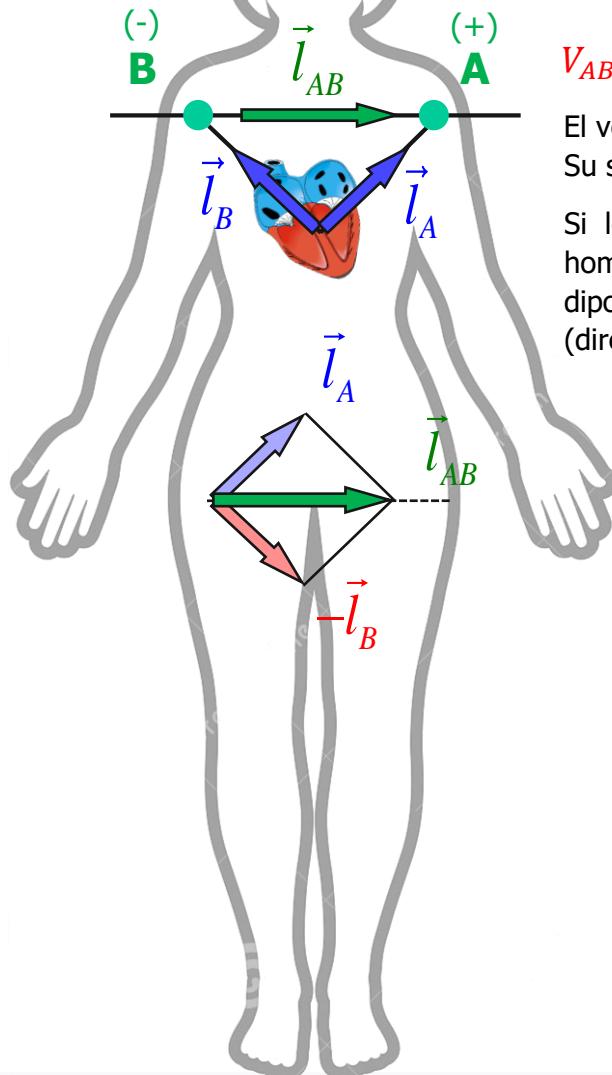
$$u_B(\vec{r}_B, t)$$

B

Electrodos equidistantes del corazón

Los vectores electrocardiográficos tienen el mismo módulo

Electrodos equidistantes
del centro del corazón



Vector de la derivación AB

$$\vec{l}_{AB} = \vec{l}_A(\vec{r}_A) - \vec{l}_B(\vec{r}_B)$$

ECG en la derivación AB

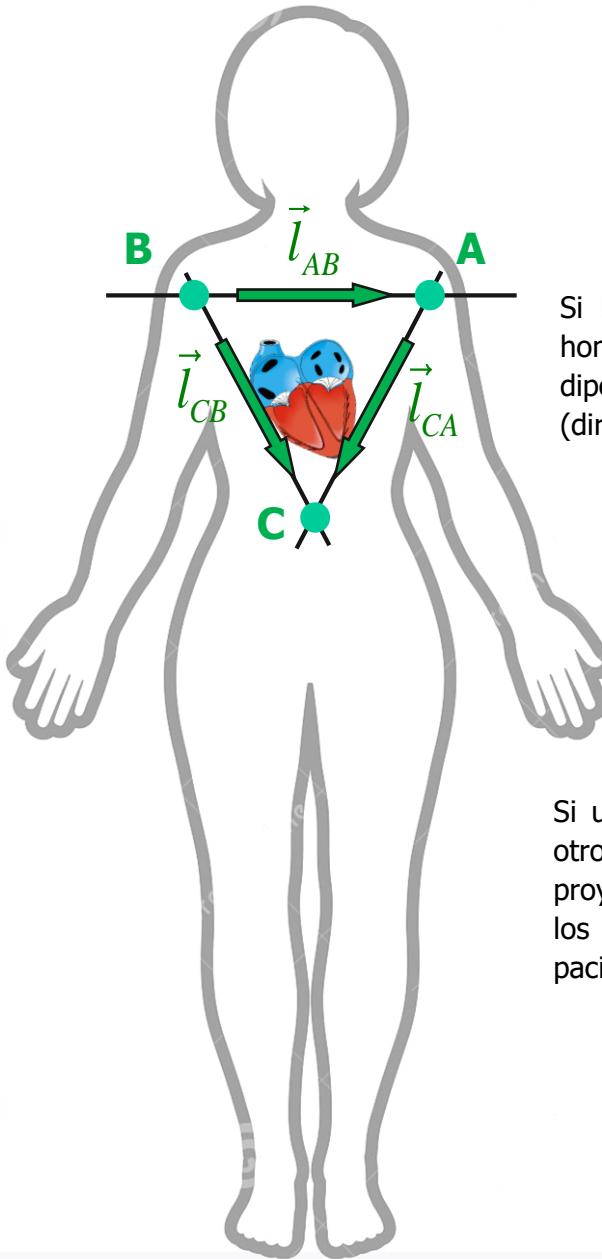
$$V_{ECG,AB} = \vec{P}(t) \cdot \vec{l}_{AB}$$

$$V_{AB} = V_A - V_B = \vec{P} \cdot (\vec{l}_A - \vec{l}_B) = \vec{P} \cdot \vec{l}_{AB}$$

El vector de derivación AB tiene la dirección de la recta que une ambos electrodos
Su sentido es del punto B (terminal negativo) hacia el A (terminal positivo)

Si los electrodos A y B están situados en los hombros, el ECG es el resultado de proyectar el dipolo cardíaco sobre la recta que los une (dirección horizontal si el/la paciente está de pie)

Electrodos equidistantes del corazón



Vector de la derivación AB

$$\vec{l}_{AB} = \vec{l}_A(\vec{r}_A) - \vec{l}_B(\vec{r}_B)$$

ECG en la derivación AB

$$V_{ECG,AB} = \vec{P}(t) \cdot \vec{l}_{AB}$$

$$V_{AB} = \vec{P} \cdot \vec{l}_{AB}$$

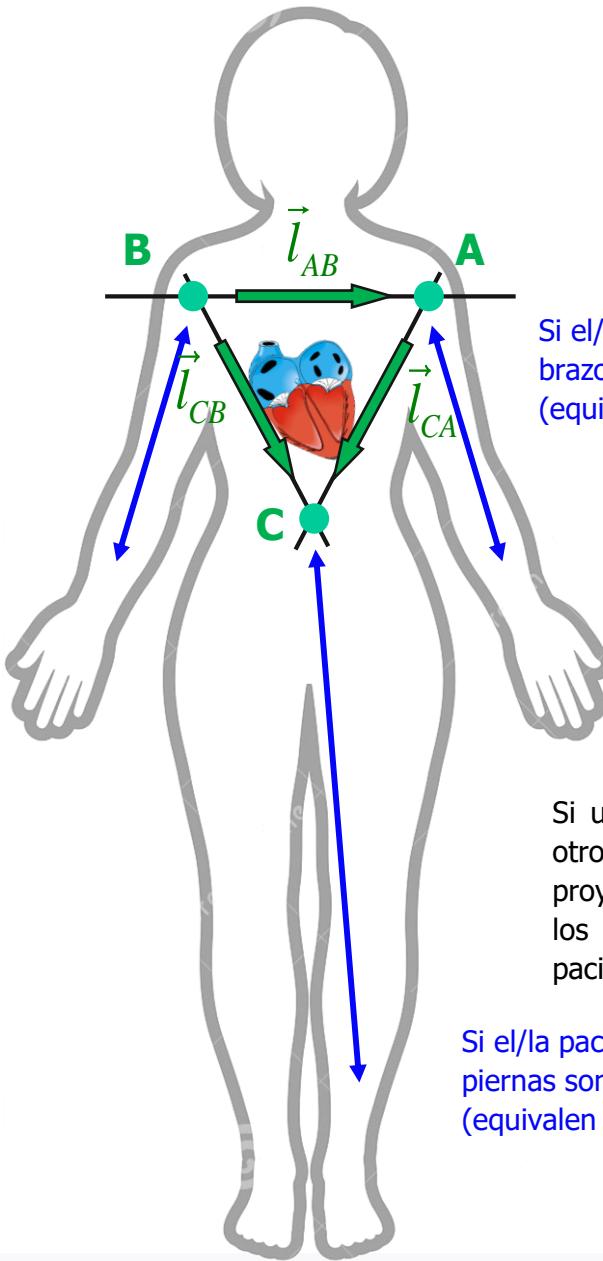
Si los electrodos A y B están situados en los hombros, el ECG es el resultado de proyectar el dipolo cardíaco sobre la recta que los une (dirección horizontal si el/la paciente está de pie)

$$V_{CB} = \vec{P} \cdot \vec{l}_{CB}$$

$$V_{CA} = \vec{P} \cdot \vec{l}_{CA}$$

Si un electrodo está en un hombro (A o B) y otro en la cadera (C), el ECG es el resultado de proyectar el dipolo cardíaco sobre la recta que los une (dirección oblicua ($\approx 60^\circ$) si el/la paciente está de pie)

Derivaciones de Extremidades



A efectos del ECG...

$$V_{AB} = \vec{P} \cdot \vec{l}_{AB}$$

Si el/la paciente está relajado/a, los brazos son eléctricamente pasivos (equivalentes a resistencias eléctricas)

$$V_{CB} = \vec{P} \cdot \vec{l}_{CB}$$

$$V_{CA} = \vec{P} \cdot \vec{l}_{CA}$$

...hombros ≈ muñecas

Si un electrodo está en un hombro (A o B) y otro en la cadera (C), el ECG es el resultado de proyectar el dipolo cardíaco sobre la recta que los une (dirección oblicua ($\approx 60^\circ$) si el/la paciente está de pie)

Si el/la paciente está relajado/a, las piernas son eléctricamente pasivas (equivalentes a resistencias eléctricas)

...caderas ≈ tobillos

Vector de

$$\vec{l}_{AB} = \vec{l}_A - \vec{l}_B$$

AHA Scientific Statement

Practice Standards for Electrocardiographic Monitoring in Hospital Settings

An American Heart Association Scientific Statement From the Councils on Cardiovascular Nursing, Clinical Cardiology, and Cardiovascular Disease in the Young

Endorsed by the International Society of Computerized Electrocardiology and the American Association of Critical-Care Nurses

Barbara J. Drew, RN, PhD, Chair; Robert M. Califf, MD; Marjorie Funk, RN, PhD; Elizabeth S. Kaufman, MD; Mitchell W. Krucoff, MD; Michael M. Laks, MD; Peter W. Macfarlane, DSc, FRCP; Claire Sommargren, RN, PhD; Steven Swiryn, MD; George F. Van Hare, MD **2018**

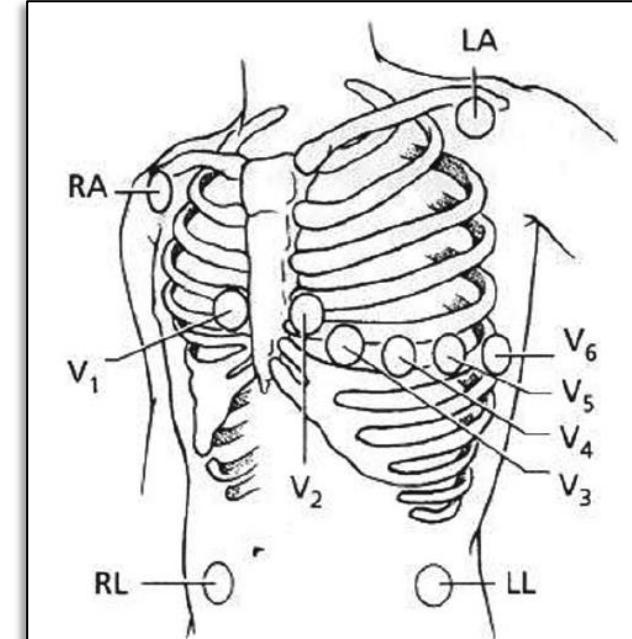
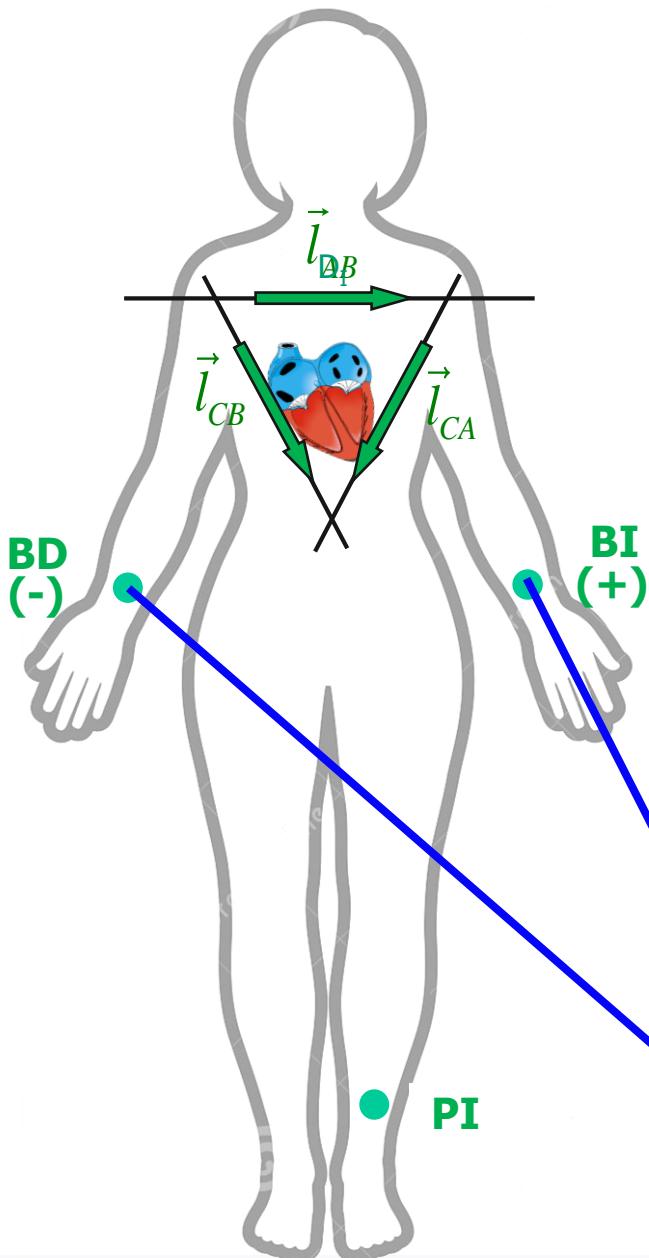


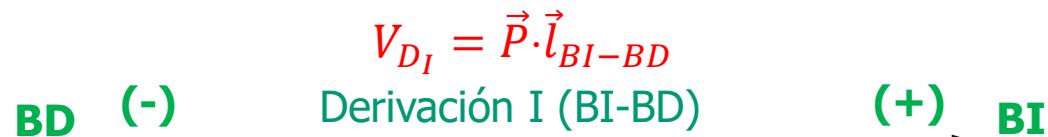
Figure 5. **Mason-Likar 12-lead ECG system.** Anatomic locations for precordial leads are the same as for recording a standard 12-lead ECG, including V₁ in 4th intercostal space at right sternal margin, V₂ in 4th intercostal space at left sternal margin, V₃ midway between V₂ and V₄, V₄ in 5th intercostal space at left midclavicular line, V₅ in left anterior axillary line at V₄ level, V₆ at left midaxillary line at V₄ and V₅ levels. Anatomic locations for limb leads are relocated from standard 12-lead ECG positions on wrists and ankles to torso.

Derivaciones de Extremidades: derivaciones estándar (Einthoven, 1908)



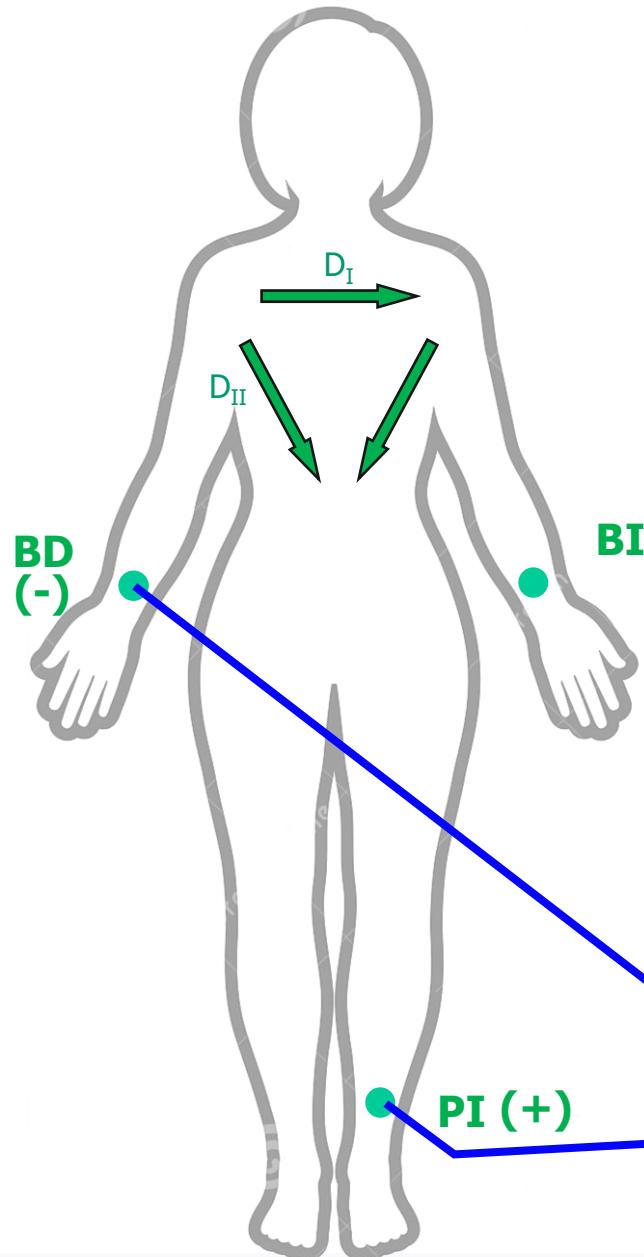
ECG en la derivación AB

$$V_{ECG,AB} = \vec{P}(t) \cdot \vec{l}_{AB}$$



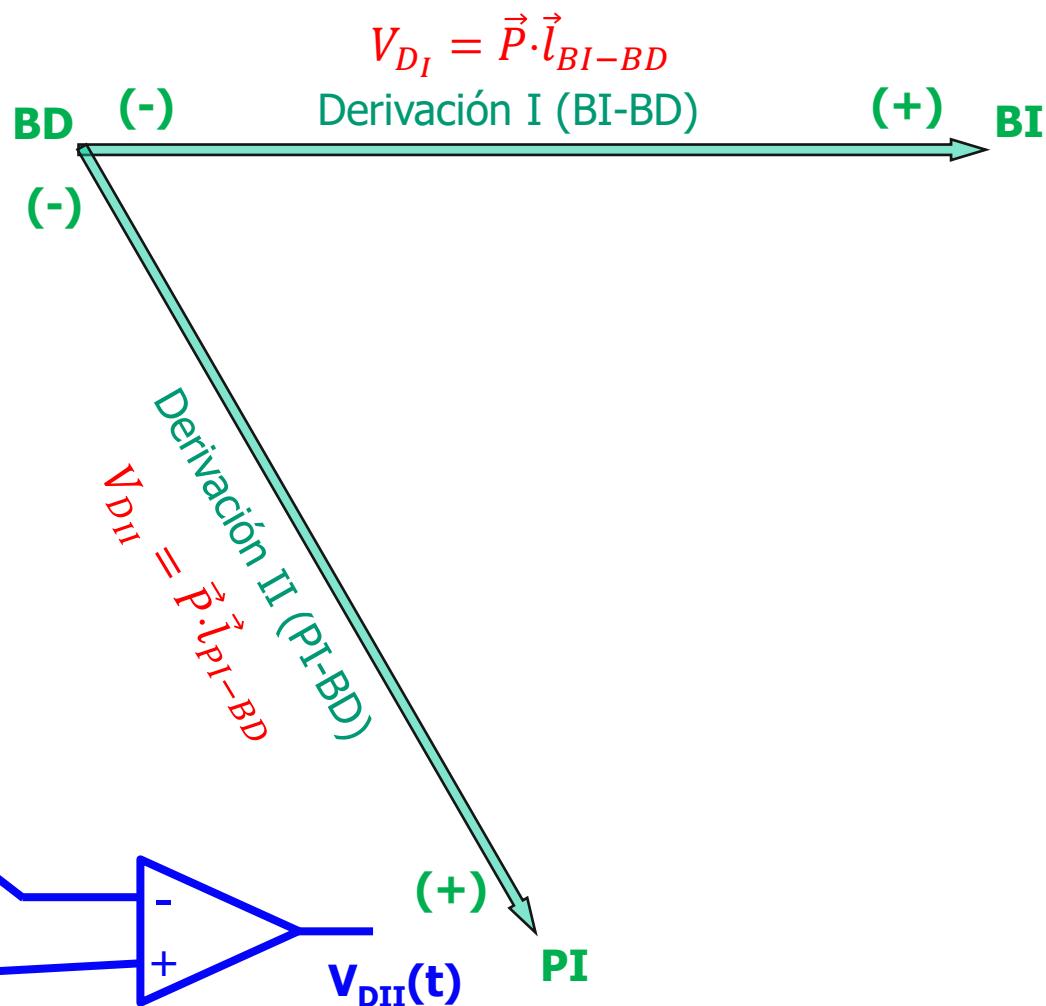
El ECG medido como diferencia de potencial entre un electrodo situado en la muñeca izquierda y otro en la muñeca derecha (derivación I) es el resultado de proyectar (dinámicamente) el vector del corazón (dipolo cardíaco) sobre la recta que une los hombros del paciente (recta horizontal si el/la paciente está de pie).

Derivaciones de Extremidades: derivaciones estándar (Einthoven, 1908)

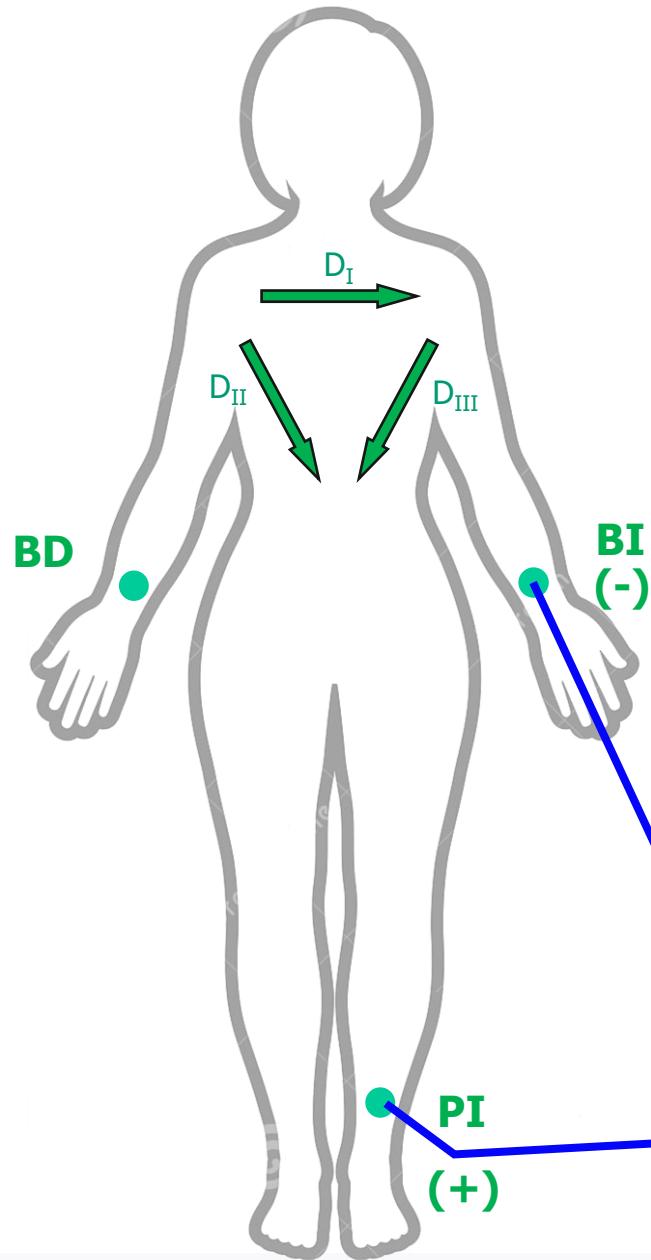


ECG en la derivación AB

$$V_{ECG,AB} = \vec{P}(t) \cdot \vec{l}_{AB}$$

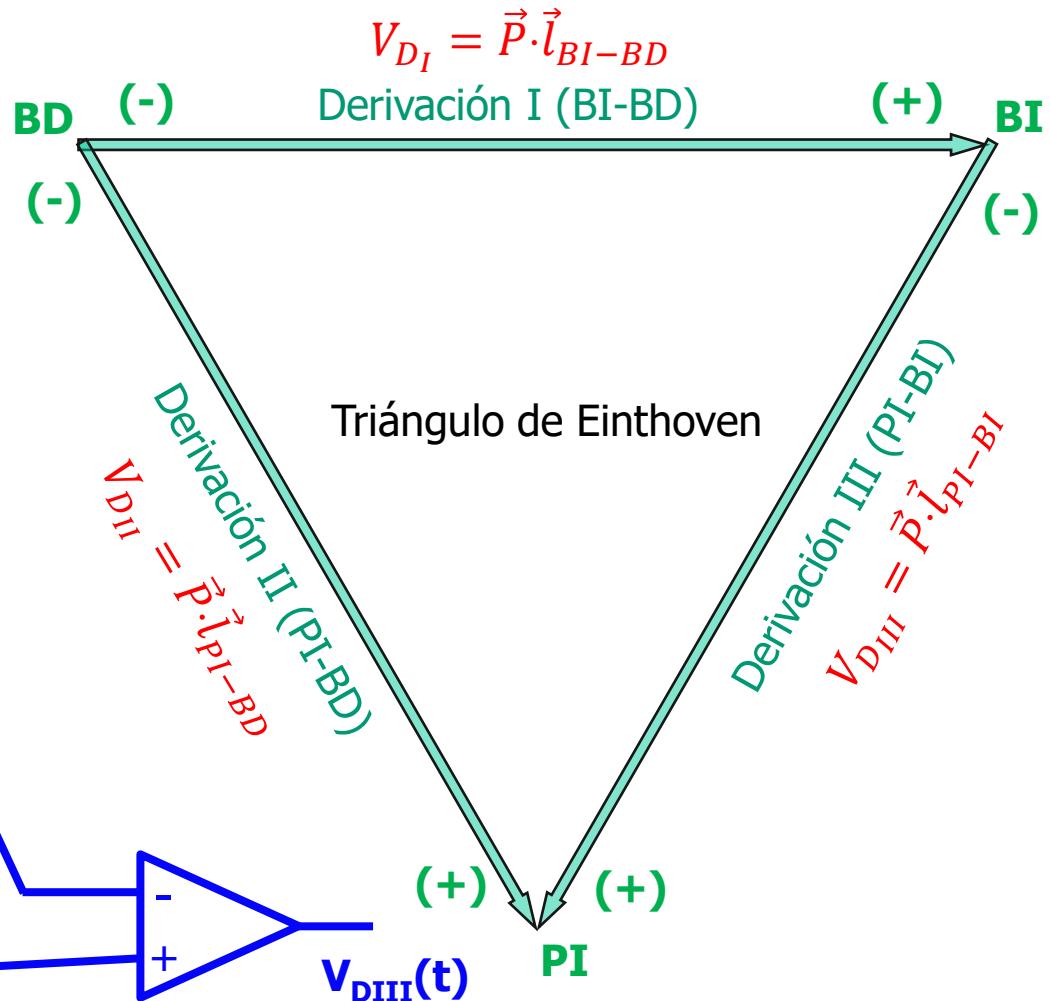


Derivaciones de Extremidades: derivaciones estándar (Einthoven, 1908)

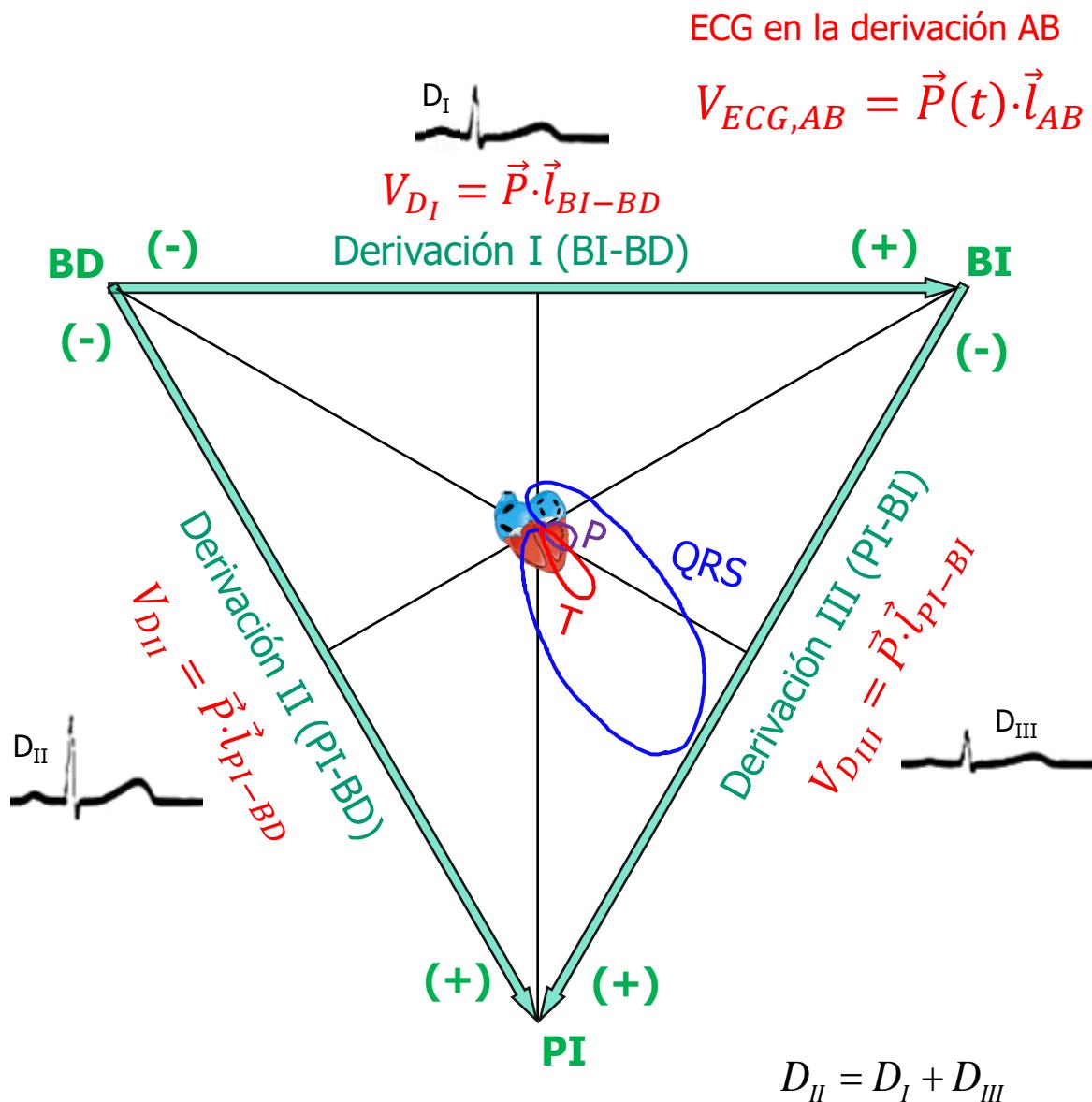
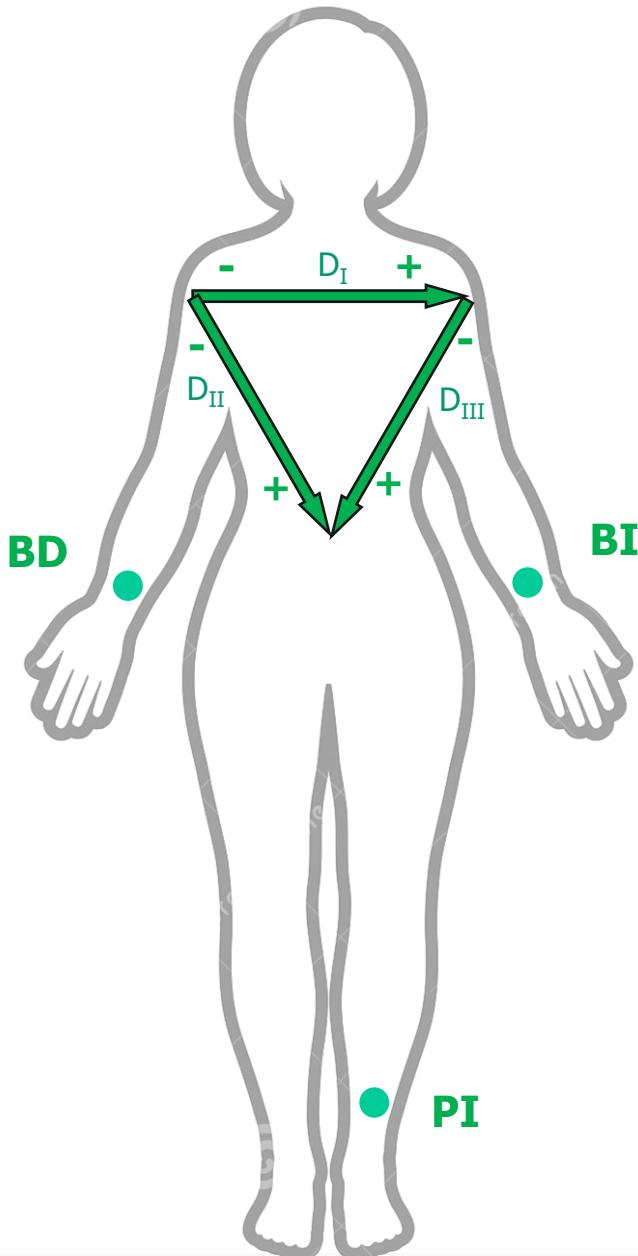


ECG en la derivación AB

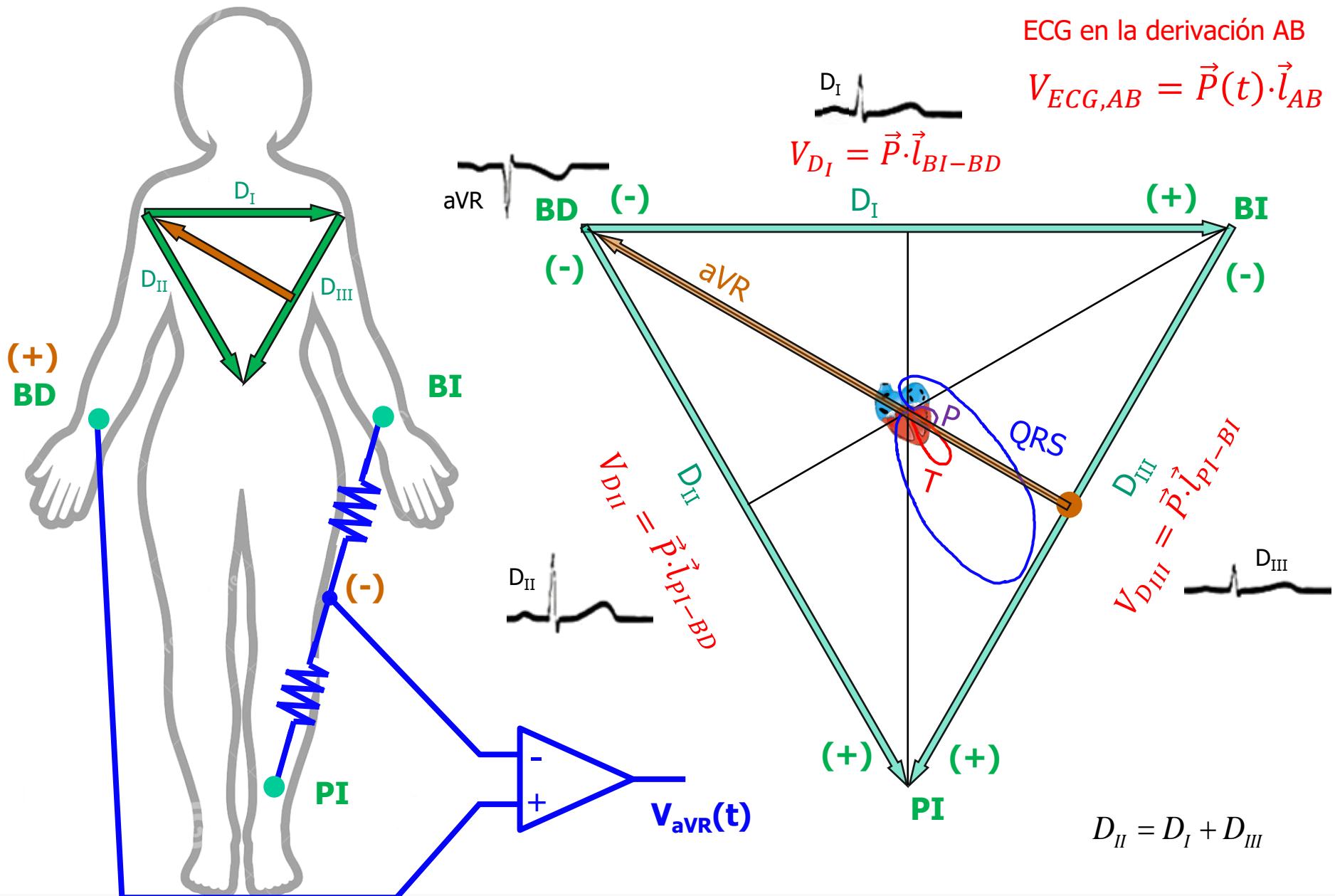
$$V_{ECG,AB} = \vec{P}(t) \cdot \vec{l}_{AB}$$



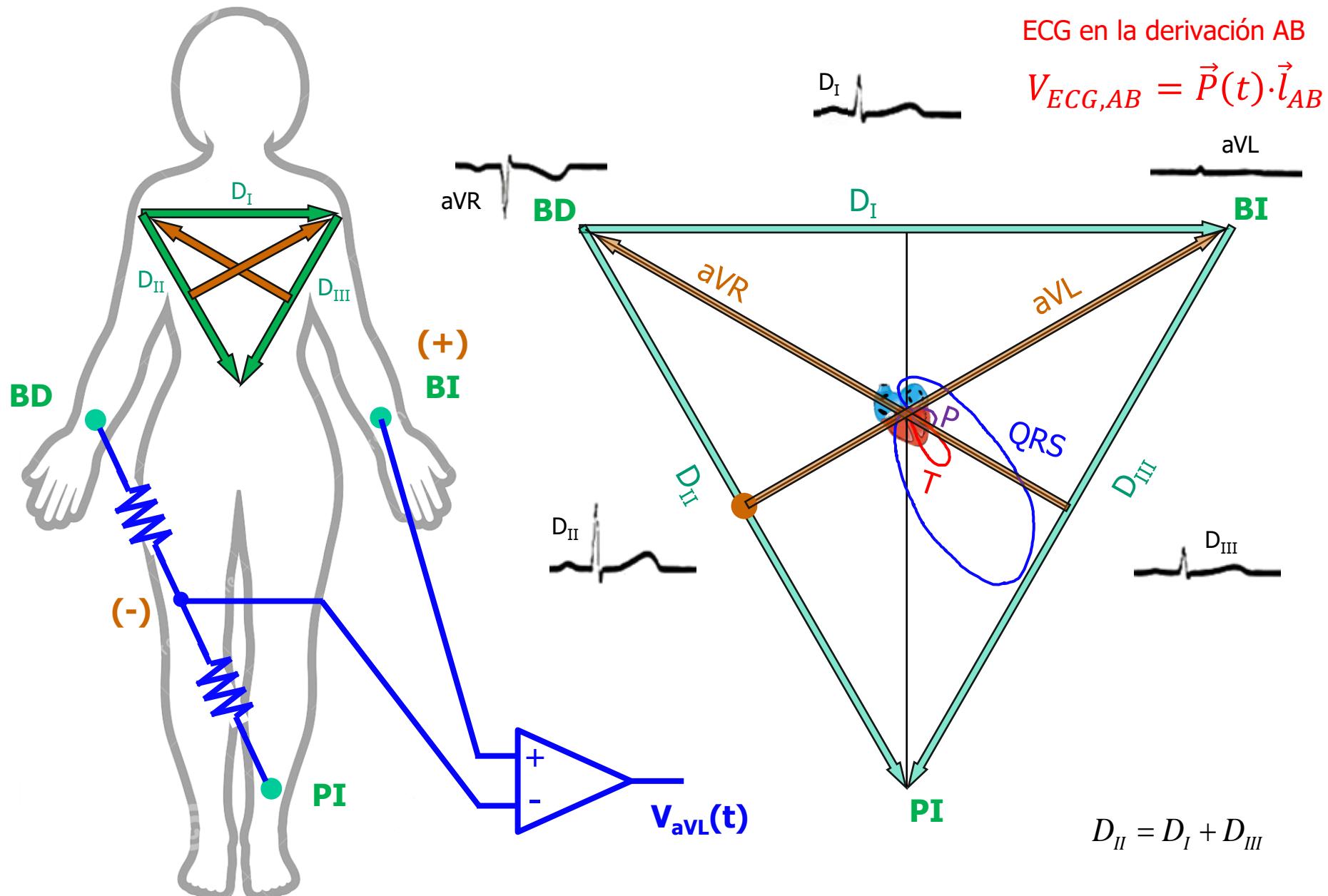
Derivaciones de Extremidades: derivaciones estándar (Einthoven, 1908)



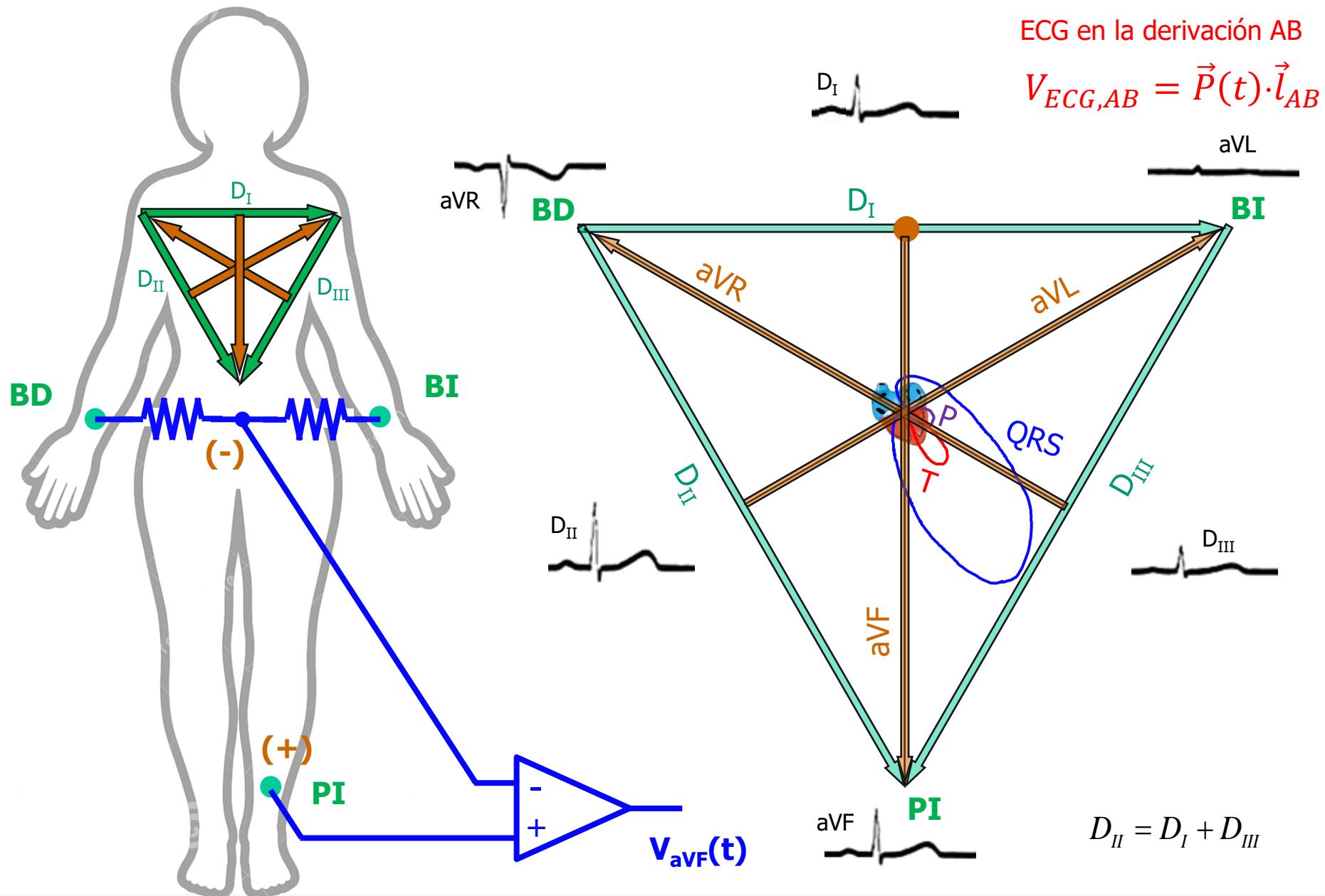
Derivaciones de Extremidades: derivaciones aumentadas (Goldberg, 1942)



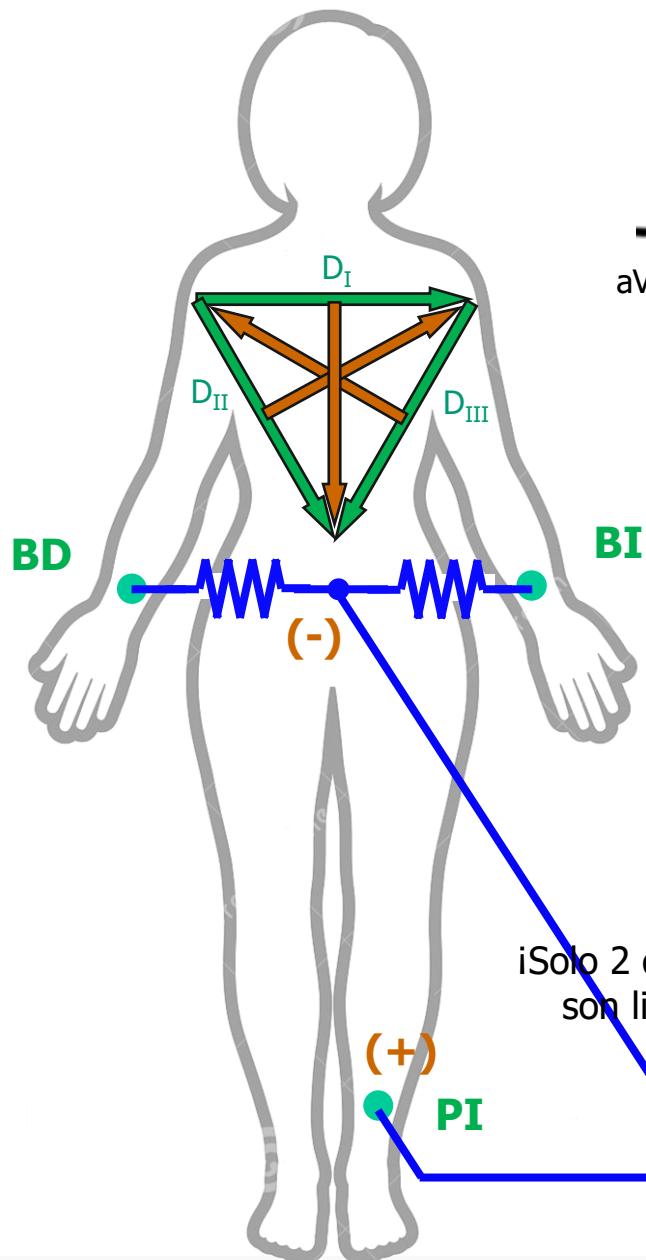
Derivaciones de Extremidades: derivaciones aumentadas (Goldberg, 1942)



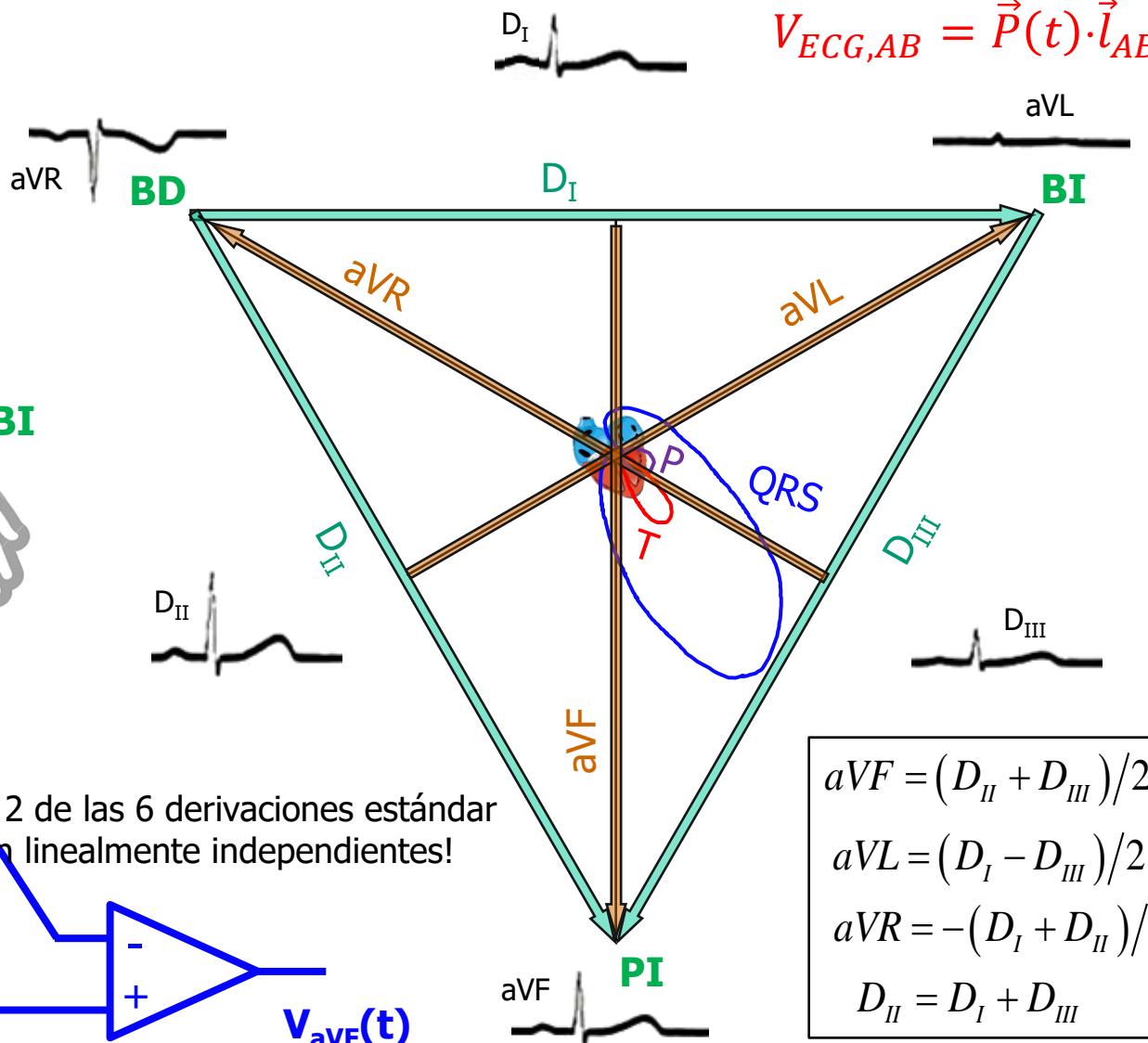
Derivaciones de Extremidades: derivaciones aumentadas (Goldberg, 1942)



Derivaciones de Extremidades: derivaciones aumentadas (Goldberg, 1942)



¡Solo 2 de las 6 derivaciones estándar son linealmente independientes!



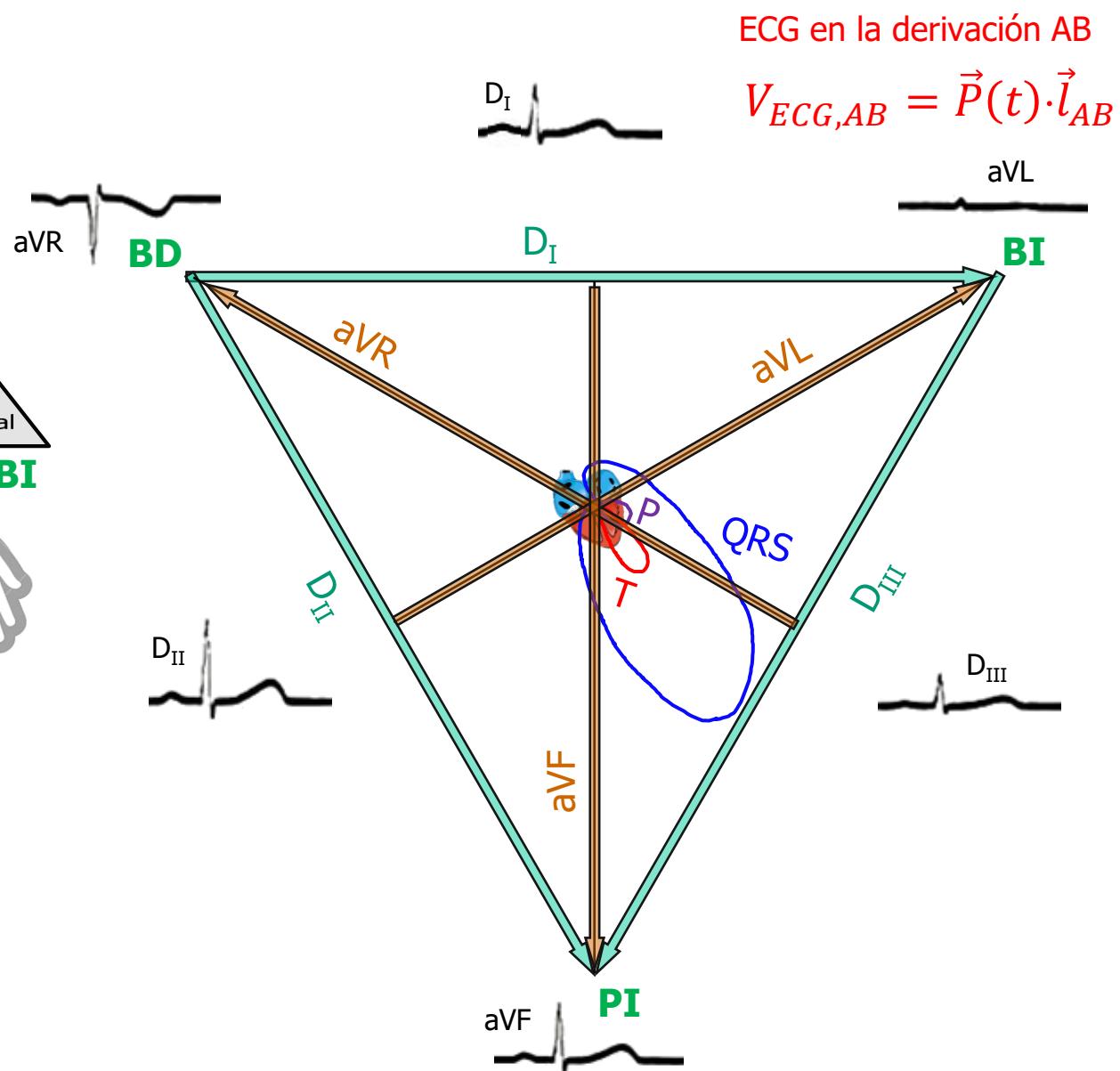
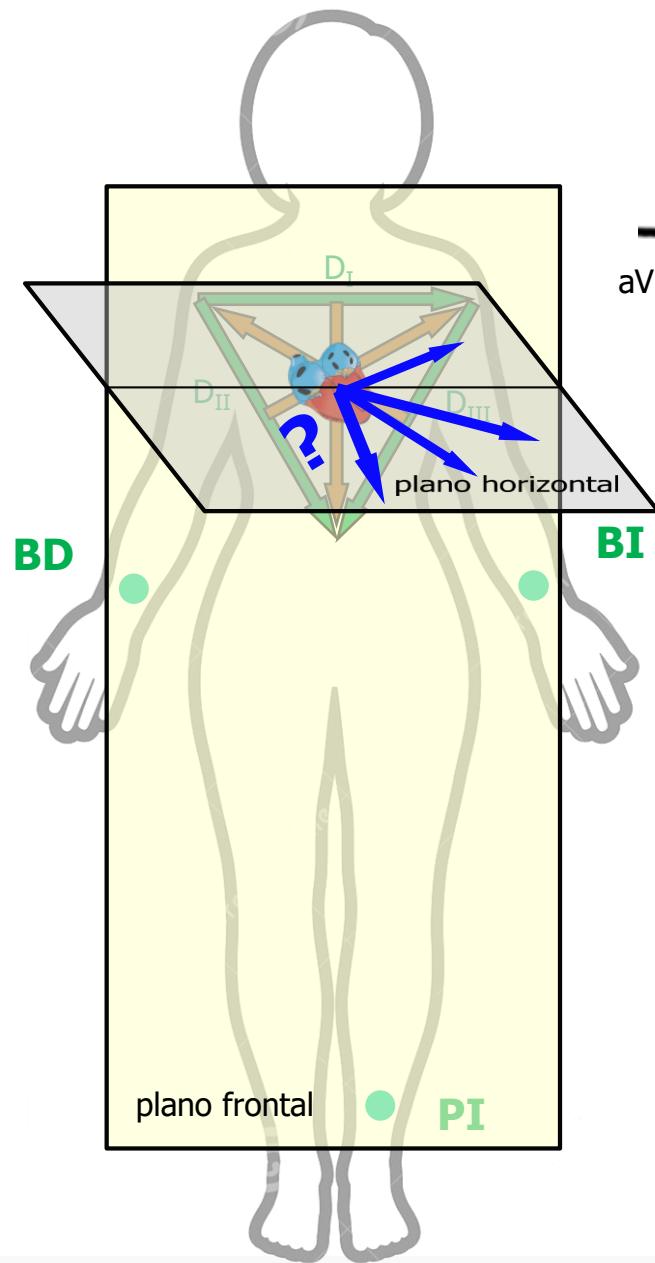
$$aVF = (D_{II} + D_{III})/2$$

$$aVL = (D_I - D_{III})/2$$

$$aVR = -(D_I + D_{II})/2$$

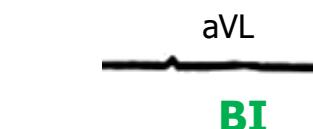
$$D_{II} = D_I + D_{III}$$

Derivaciones Precordiales (Wilson, 1931)

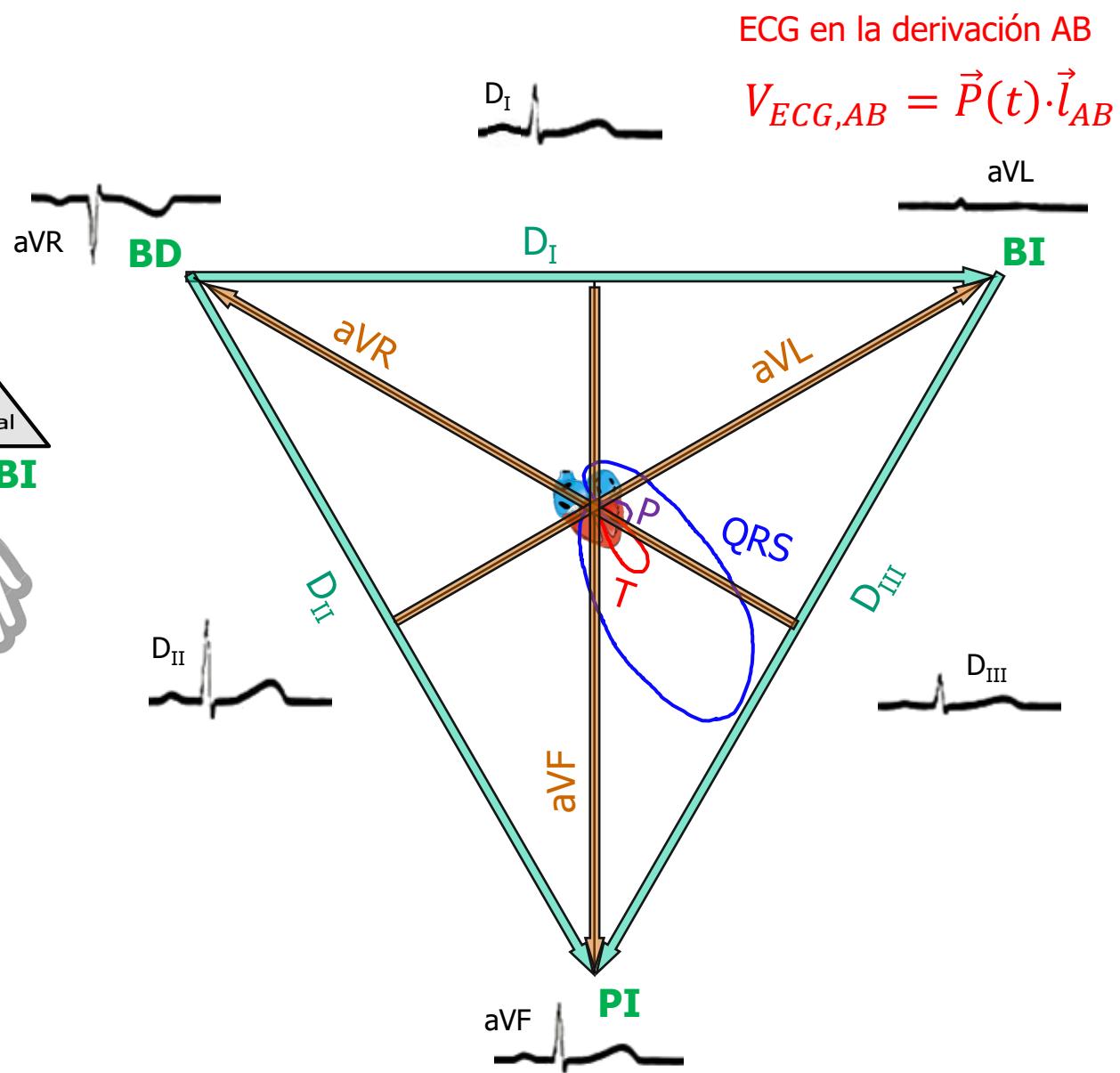
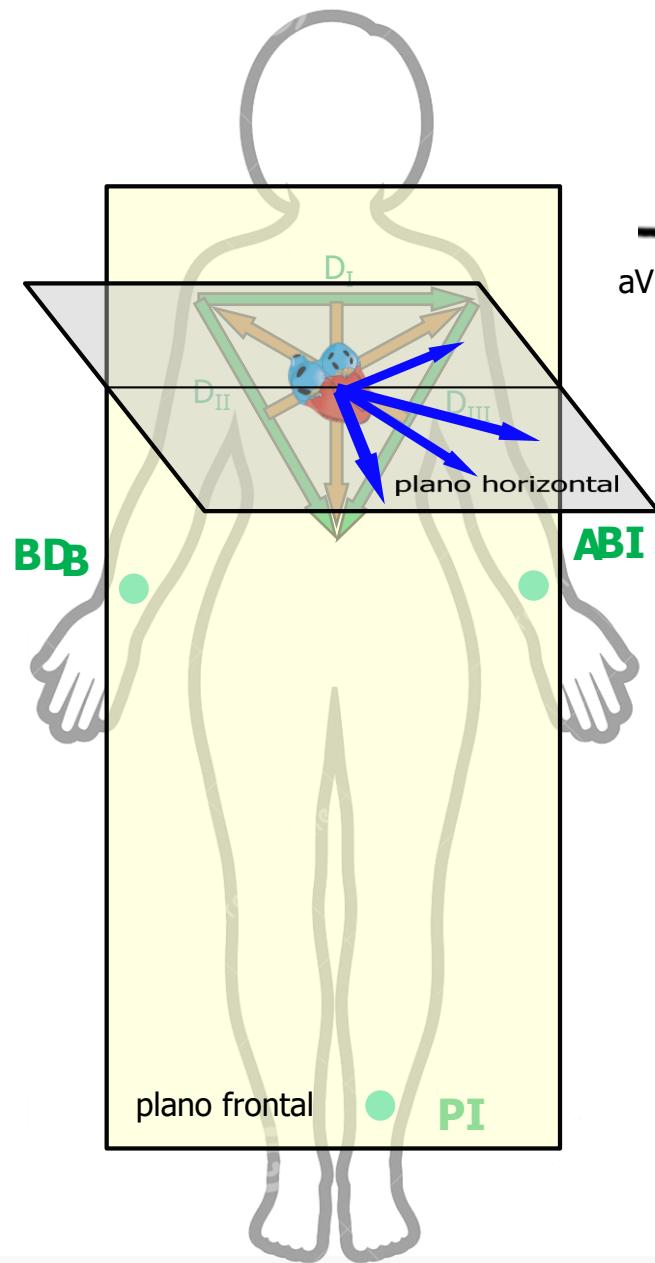


ECG en la derivación AB

$$V_{ECG,AB} = \vec{P}(t) \cdot \vec{l}_{AB}$$



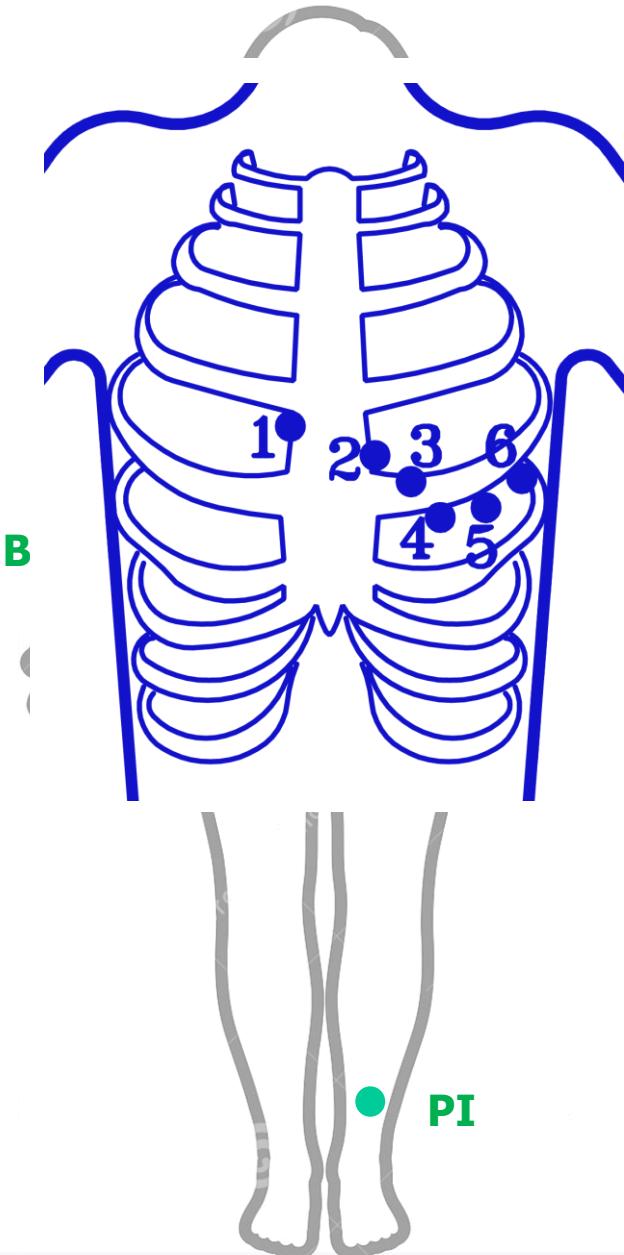
Derivaciones Precordiales (Wilson, 1931)



ECG en la derivación AB

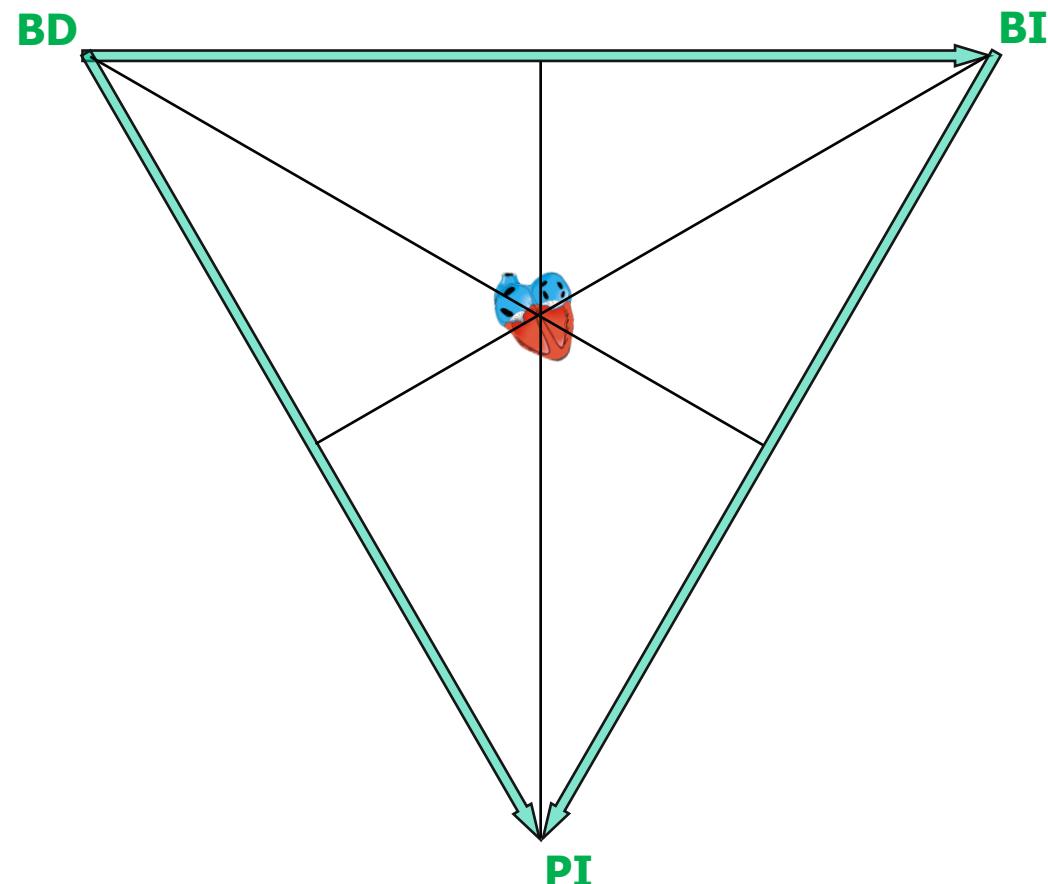
$$V_{ECG,AB} = \vec{P}(t) \cdot \vec{l}_{AB}$$

Derivaciones Precordiales (Wilson, 1931)



ECG en la derivación AB

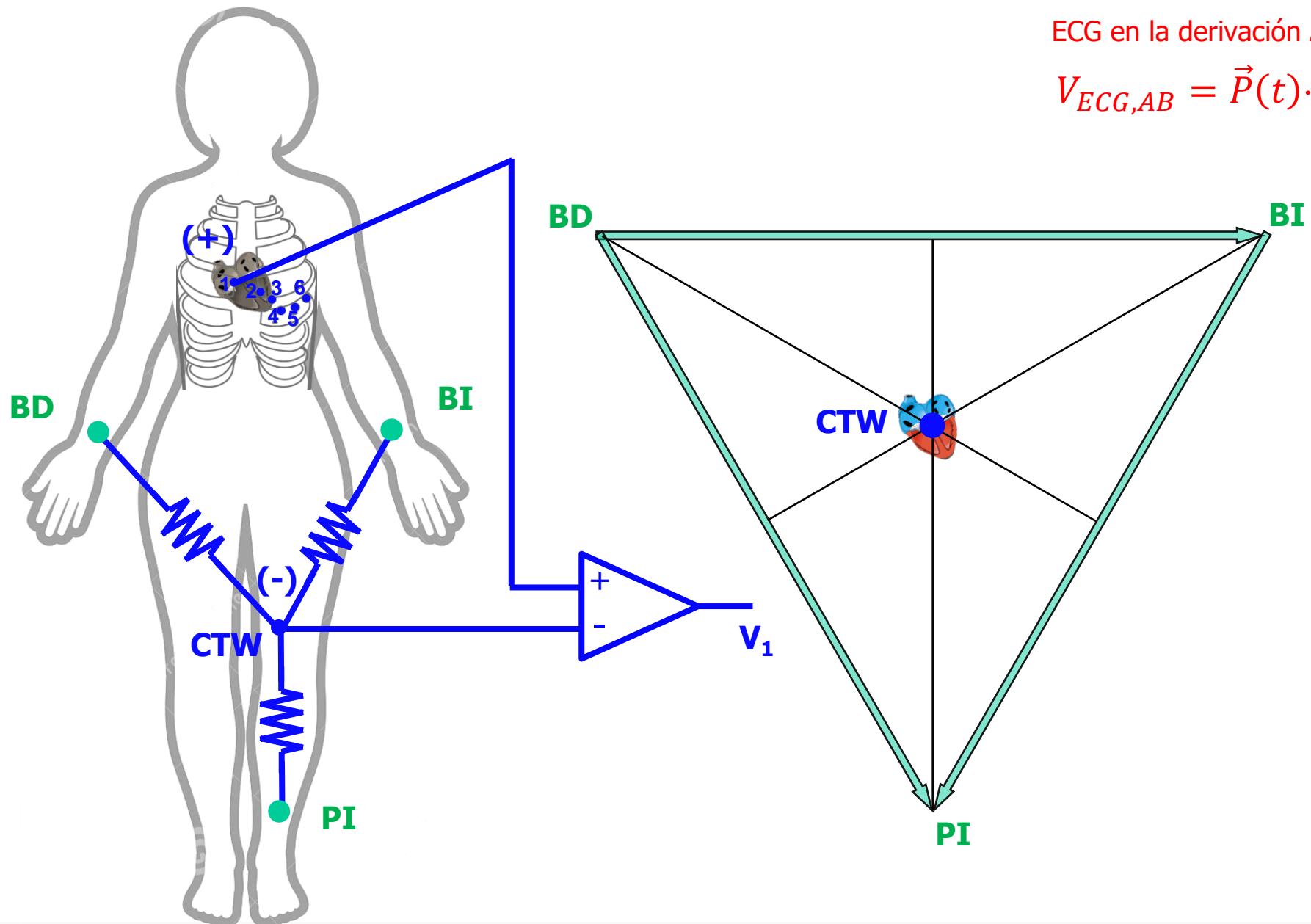
$$V_{ECG,AB} = \vec{P}(t) \cdot \vec{l}_{AB}$$



Derivaciones Precordiales (Wilson, 1931)

ECG en la derivación AB

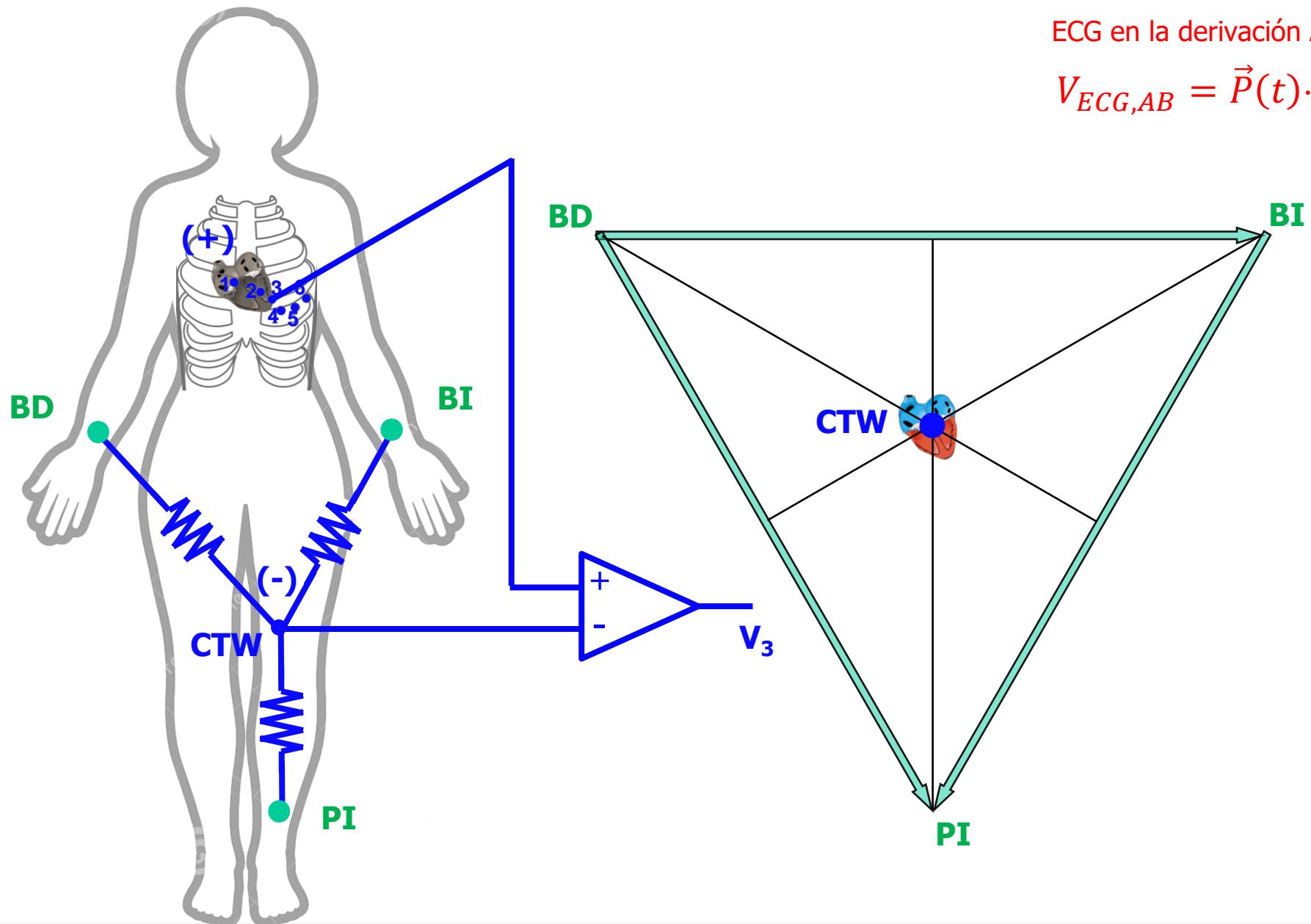
$$V_{ECG,AB} = \vec{P}(t) \cdot \vec{l}_{AB}$$



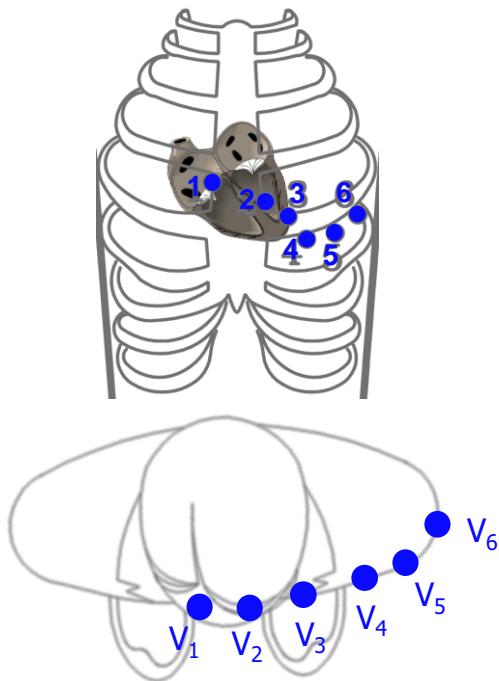
Derivaciones Precordiales (Wilson, 1931)

ECG en la derivación AB

$$V_{ECG,AB} = \vec{P}(t) \cdot \vec{l}_{AB}$$

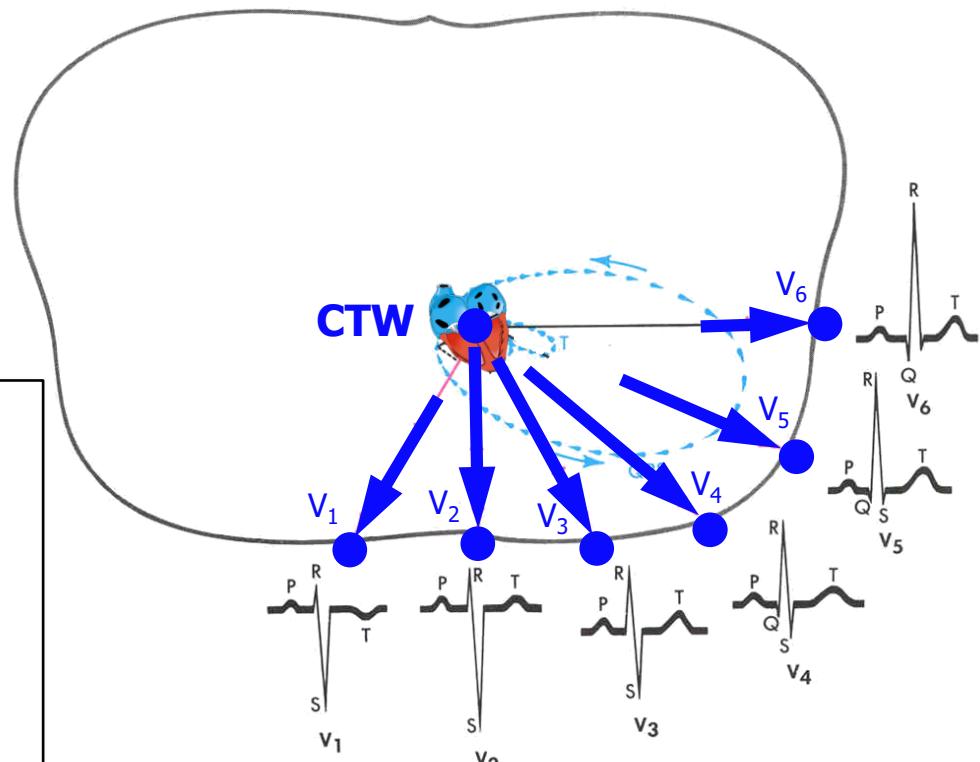


Derivaciones Precordiales (Wilson, 1931)



ECG en la derivación AB

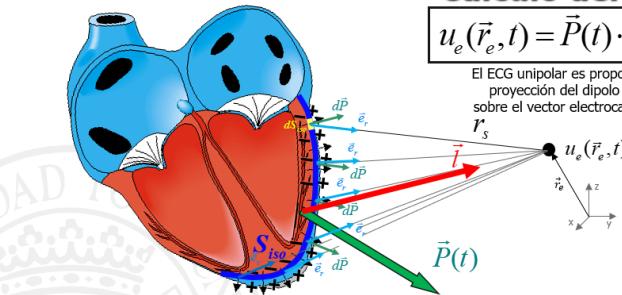
$$V_{ECG,AB} = \vec{P}(t) \cdot \vec{l}_{AB}$$



Cálculo del ECG

$$u_e(\vec{r}_e, t) = \vec{P}(t) \cdot \vec{l}(\vec{r}_e)$$

El ECG unipolar es proporcional a la proyección del dipolo cardíaco sobre el vector electrocardiográfico



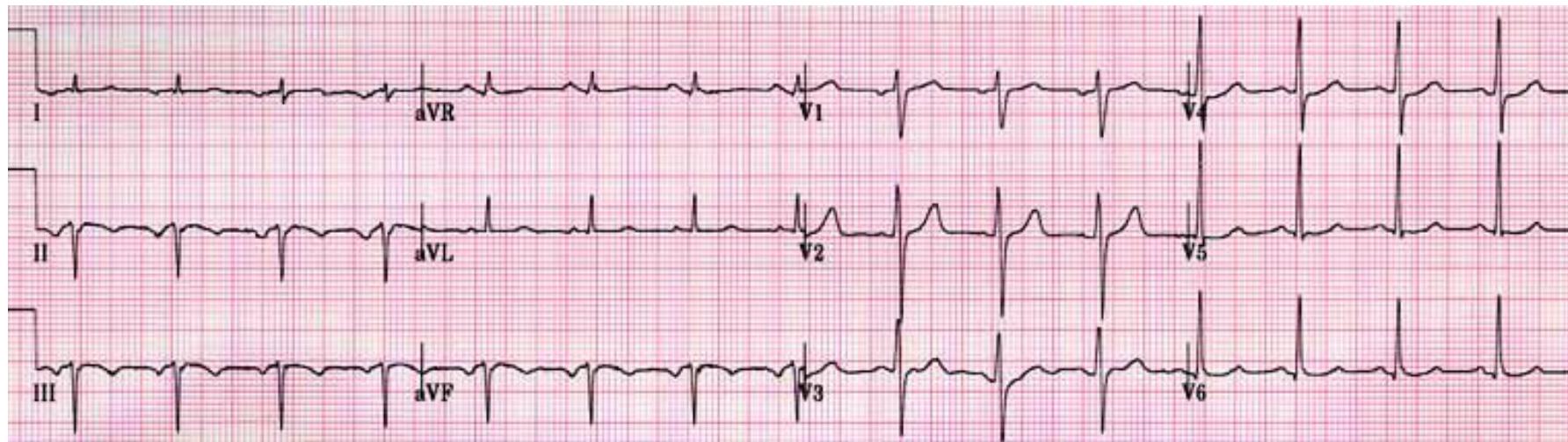
vector electrocardiográfico

$$\vec{l}(\vec{r}_e) = \frac{1}{4\pi\sigma_e} \left[\frac{\vec{e}_r}{r_s^2} \right]$$

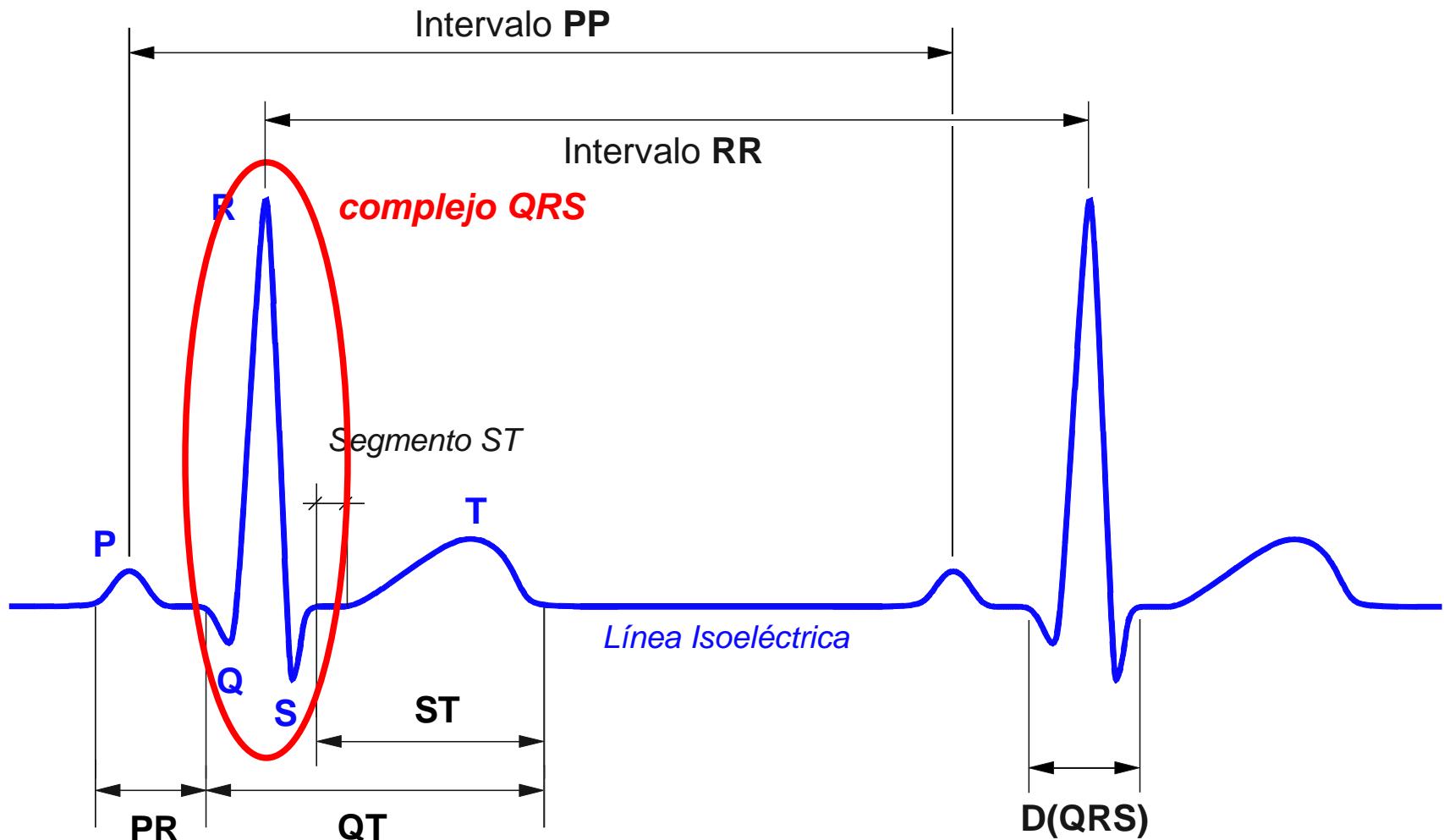
- La dirección del vector electrocardiográfico es la de la recta que une el punto de medida con el centro de gravedad del corazón
- El sentido del vector electrocardiográfico es desde el corazón hacia el punto de medida
- El módulo del vector electrocardiográfico es tanto mayor cuanto más cerca esté el punto de medida del corazón (ley del cuadrado de la distancia).



El ECG standard



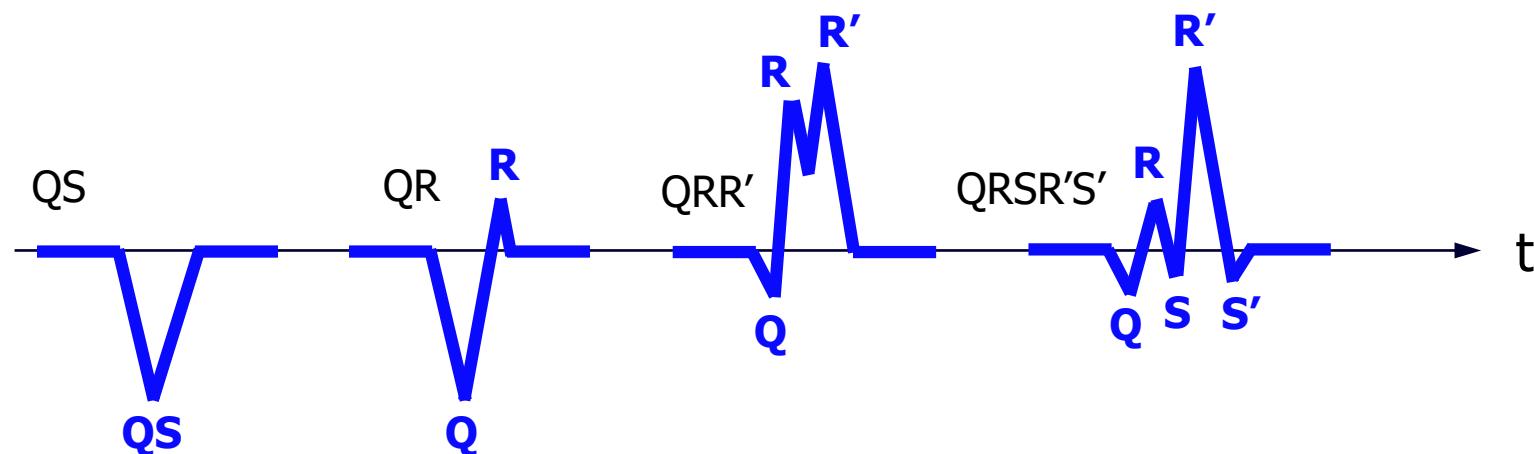
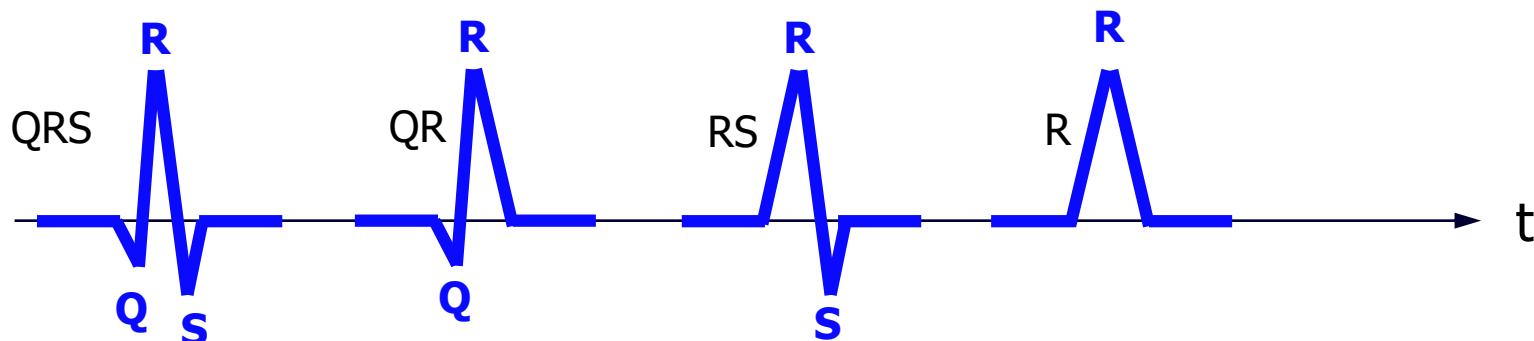
El ECG normal



¿De qué depende (qué está reflejando) cada intervalo o segmento?

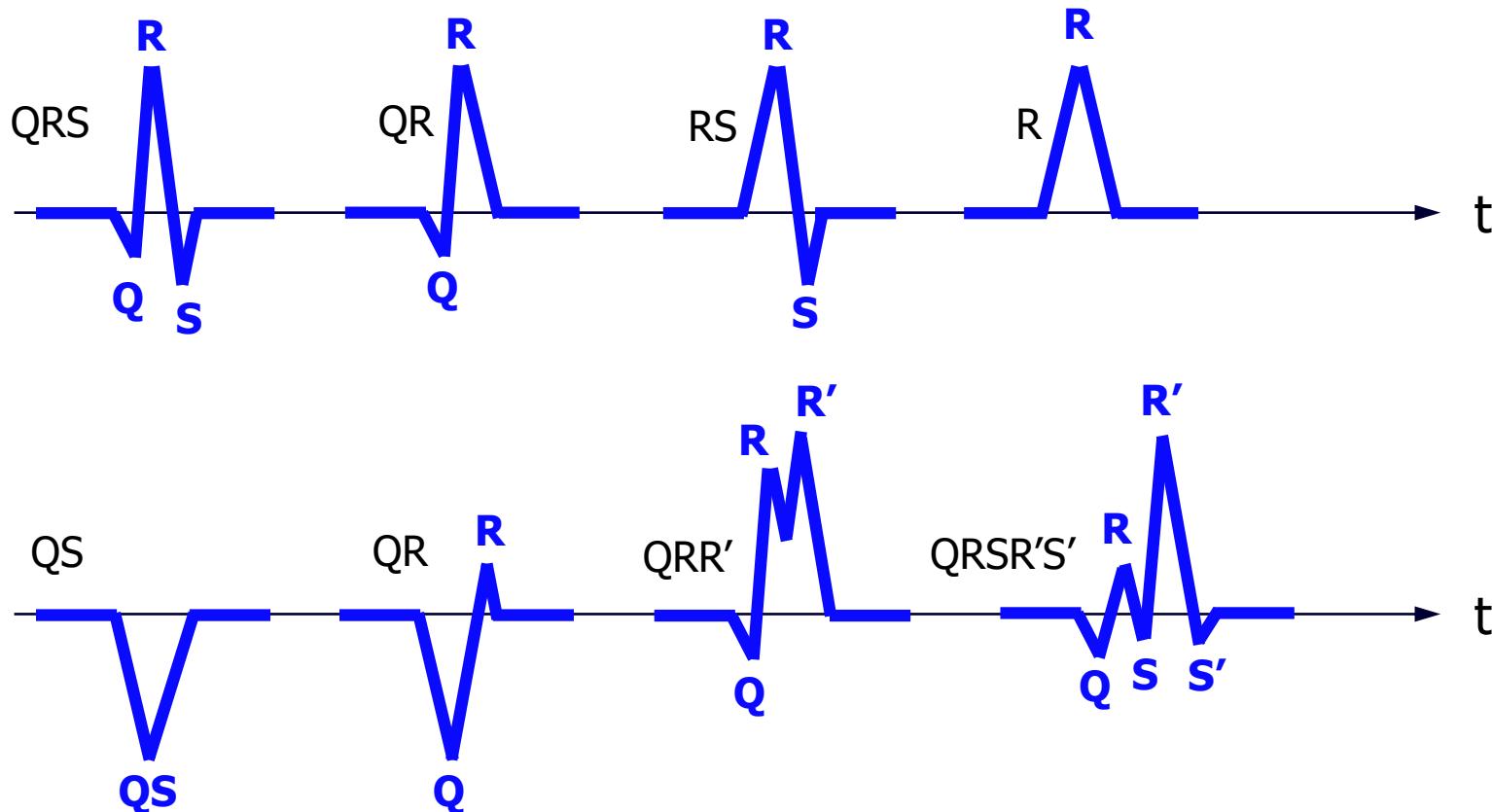
Nomenclatura del complejo QRS

- Onda R: primera onda positiva del complejo
- Onda Q: onda negativa inmediatamente anterior a la onda R
- Onda S: onda negativa inmediatamente posterior a la onda R
- Onda QS: única onda negativa del complejo
- Onda R': segunda onda positiva del complejo
- Onda S': onda negativa inmediatamente posterior a la onda R'



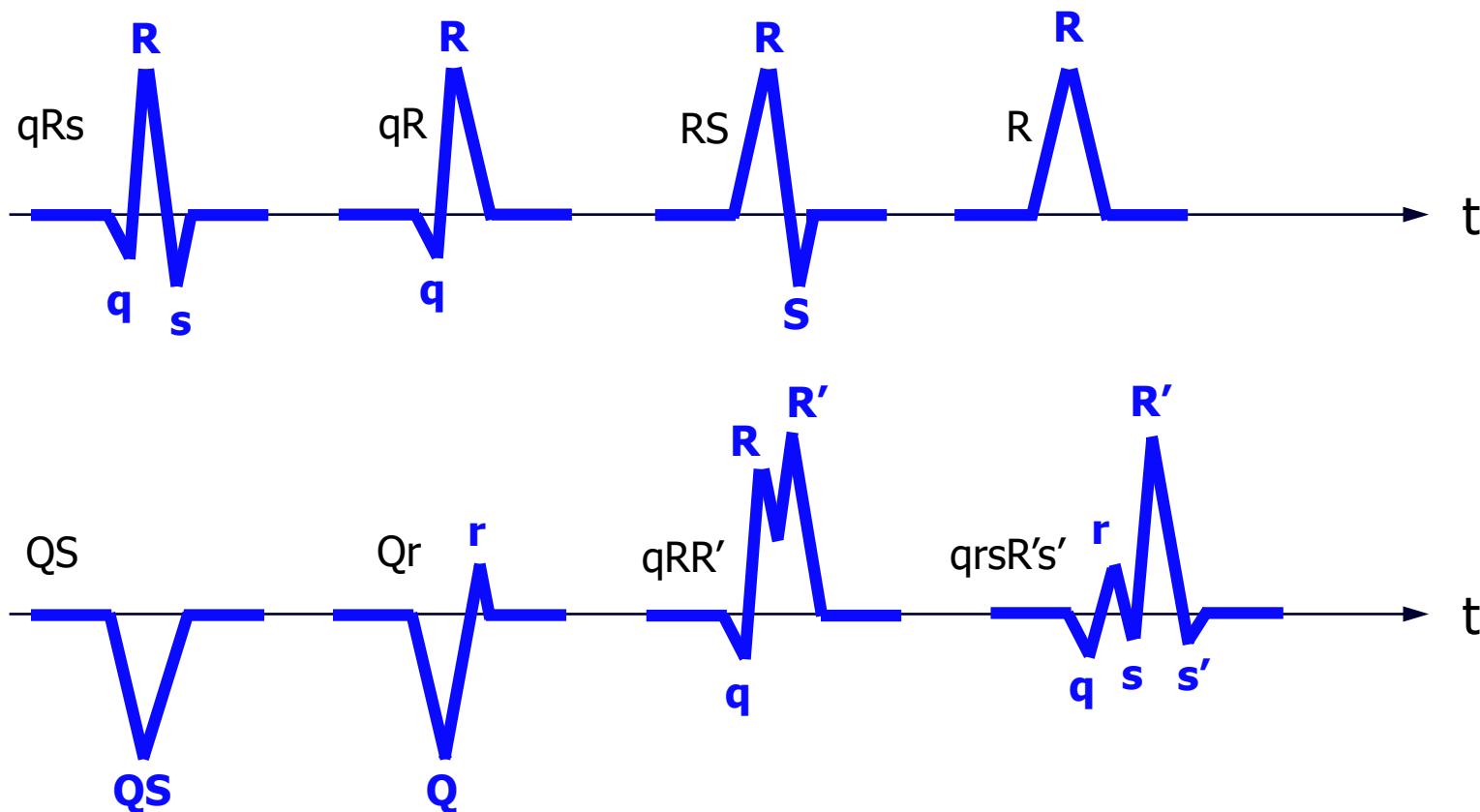
Nomenclatura del complejo QRS... mejorada

- LETRA MAYÚSCULA SI UNA Onda ES AL MENOS 1/3 DE LA AMPLITUD DE LA MAYOR DE TODAS
- Letra minúscula si una onda es menor de 1/3 de la amplitud de la mayor de todas



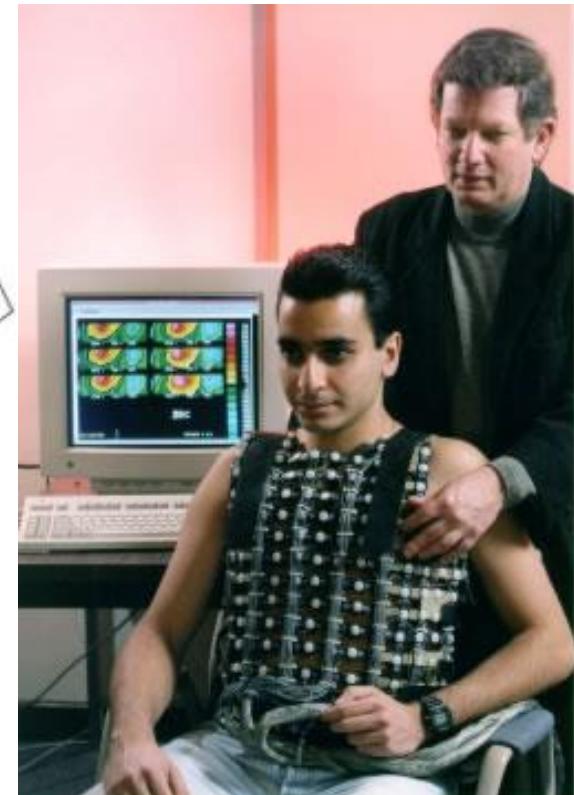
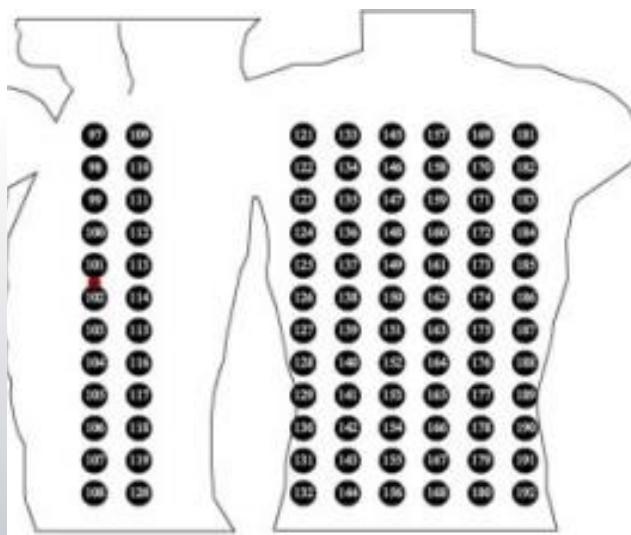
Nomenclatura del complejo QRS... mejorada

- LETRA MAYÚSCULA SI UNA Onda ES AL MENOS 1/3 DE LA AMPLITUD DE LA MAYOR DE TODAS
- Letra minúscula si una onda es menor de 1/3 de la amplitud de la mayor de todas



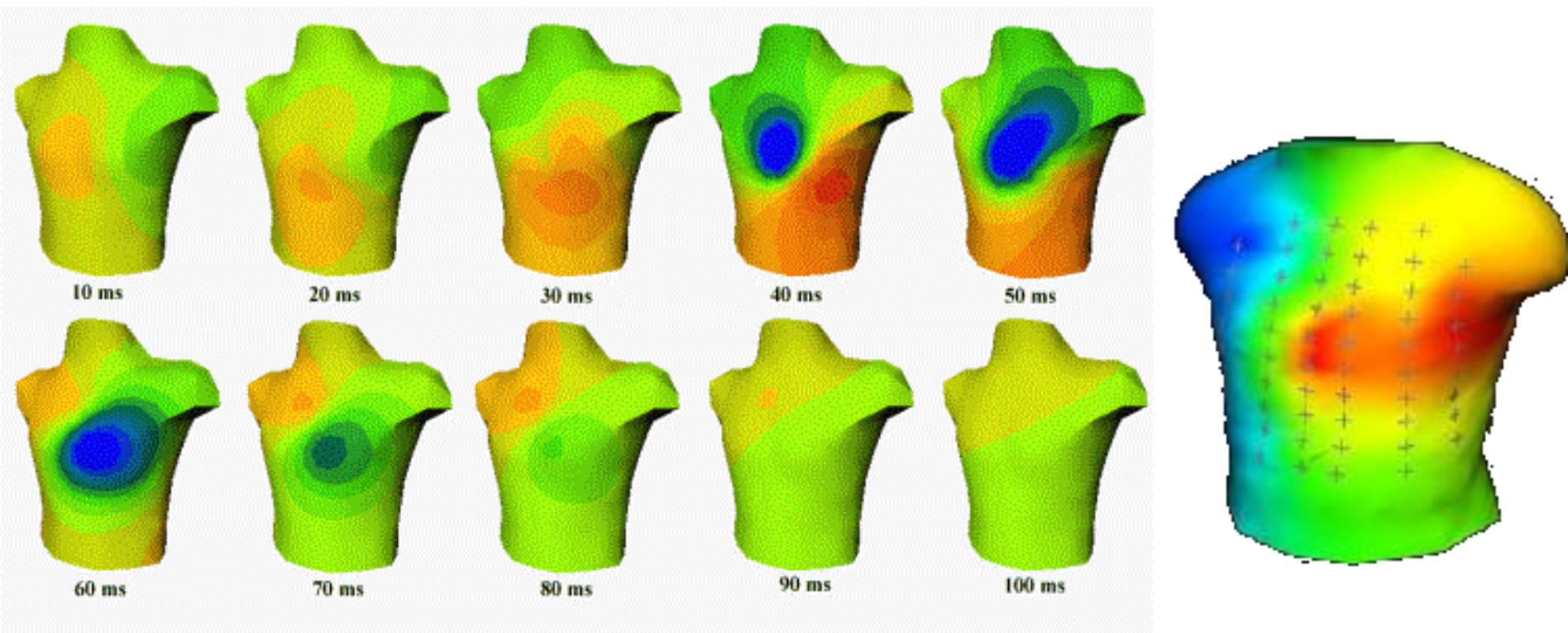
El BSPM (Body Surface Potential Map)

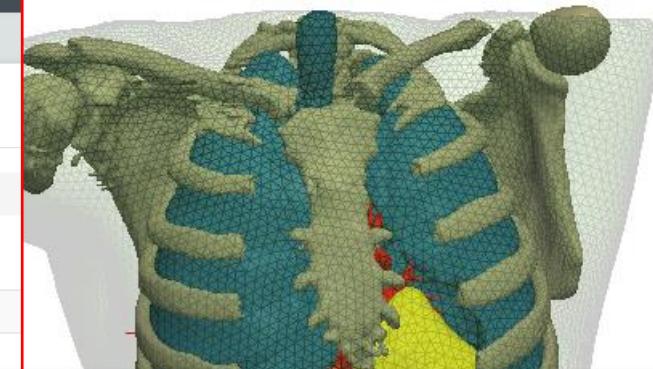
¿por qué contentarse con 12 derivaciones? Ya no estamos en 1942...



El BSPM (Body Surface Potential Map)

¿por qué contentarse con 12 derivaciones? Ya no estamos en 1942...





III. EL TEOREMA DE GREEN GENERALIZADO (CON APLICACIÓN AL ECG)

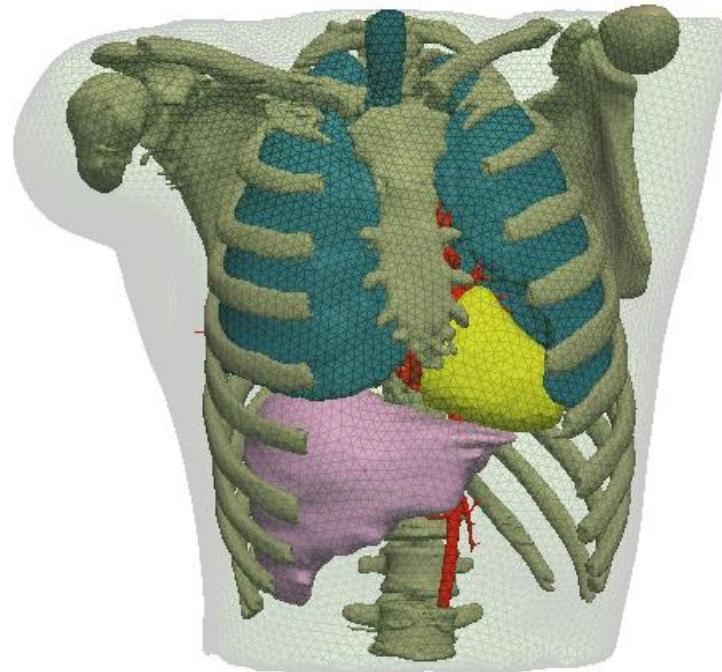
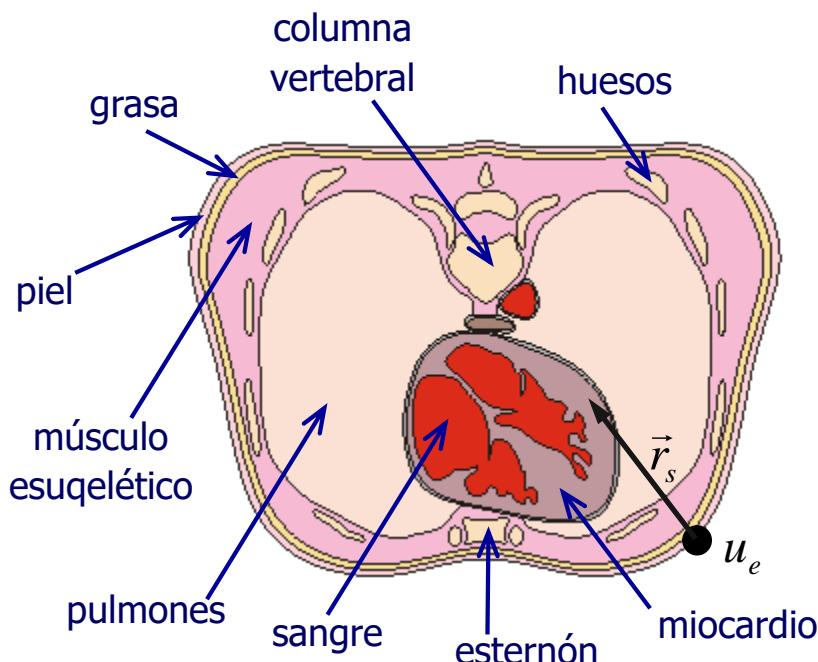
El teorema de Green es particularmente útil en el estudio de campos eléctricos. En concreto, proporciona una forma integral de la solución de un problema de contorno como, por ejemplo, el asociado a la ecuación de Poisson. Debería hablarse, en realidad, de “los teoremas de Green”, pues existen diferentes versiones del teorema. Cada una de estas versiones se obtiene de la aplicación del teorema de Gauss-Ostrogradski (“teorema de la divergencia”), que se explica en el siguiente apartado, a diferentes campos escogidos adecuadamente.

III.1. Teorema de Gauss-Ostrogradski

El teorema de Gauss establece que la integral de la divergencia de un campo vectorial \mathbf{J} extendida a un volumen simplemente conexo τ es igual al flujo saliente de dicho campo a través de la superficie S_τ simplemente conexa que limita el volumen. Matemáticamente:

$$\iiint_{\tau} \vec{\nabla} \cdot \vec{J} d\tau = \iint_{S_\tau} \vec{J} \cdot \vec{n}_S dS_\tau \quad (\text{A1.1})$$

Simulación del ECG (anatomía realista)



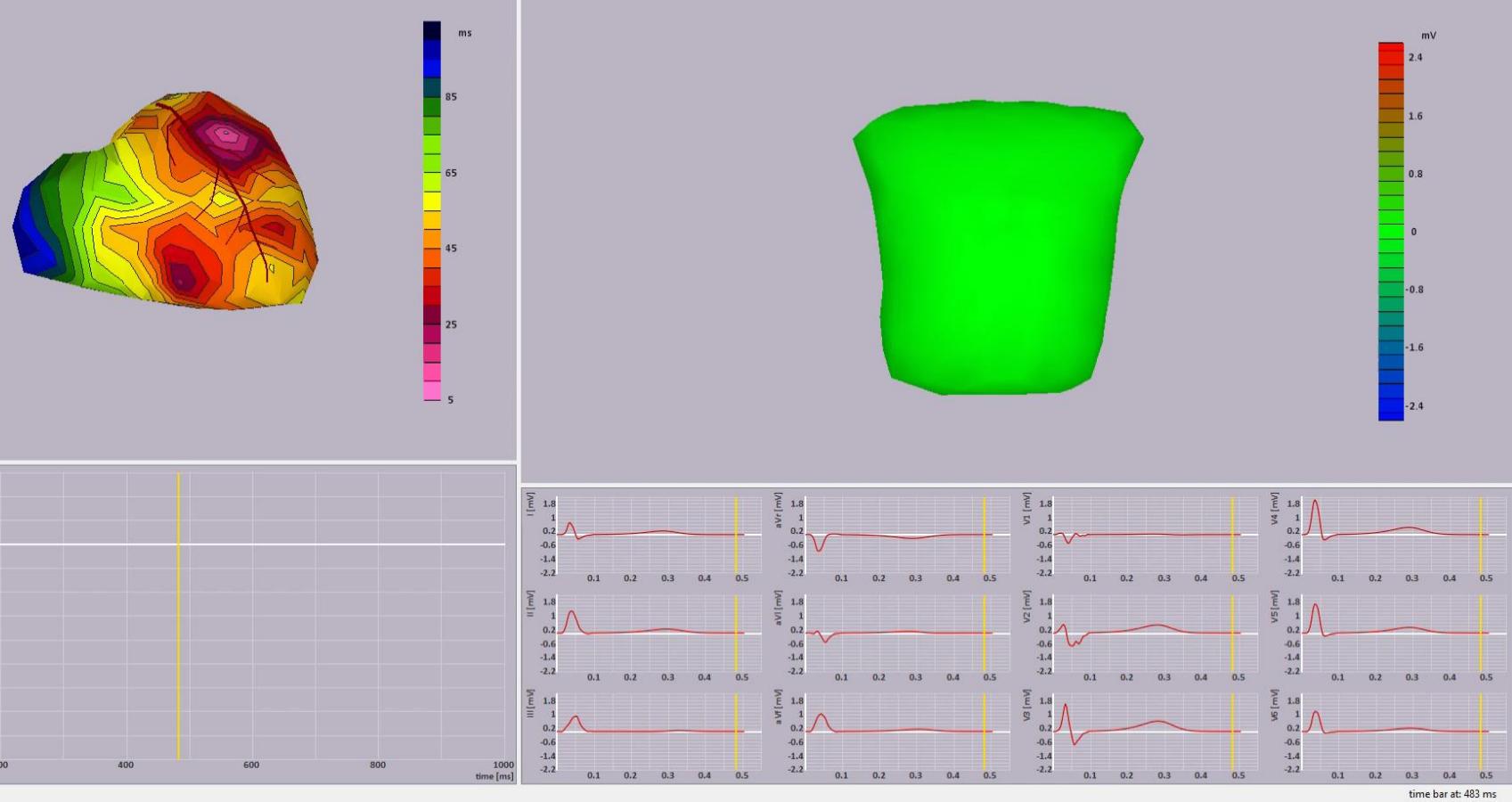
Medio
ilimitado

Límite del medio
(frontera = piel)

Interfaces entre tejidos de
diferente conductividad

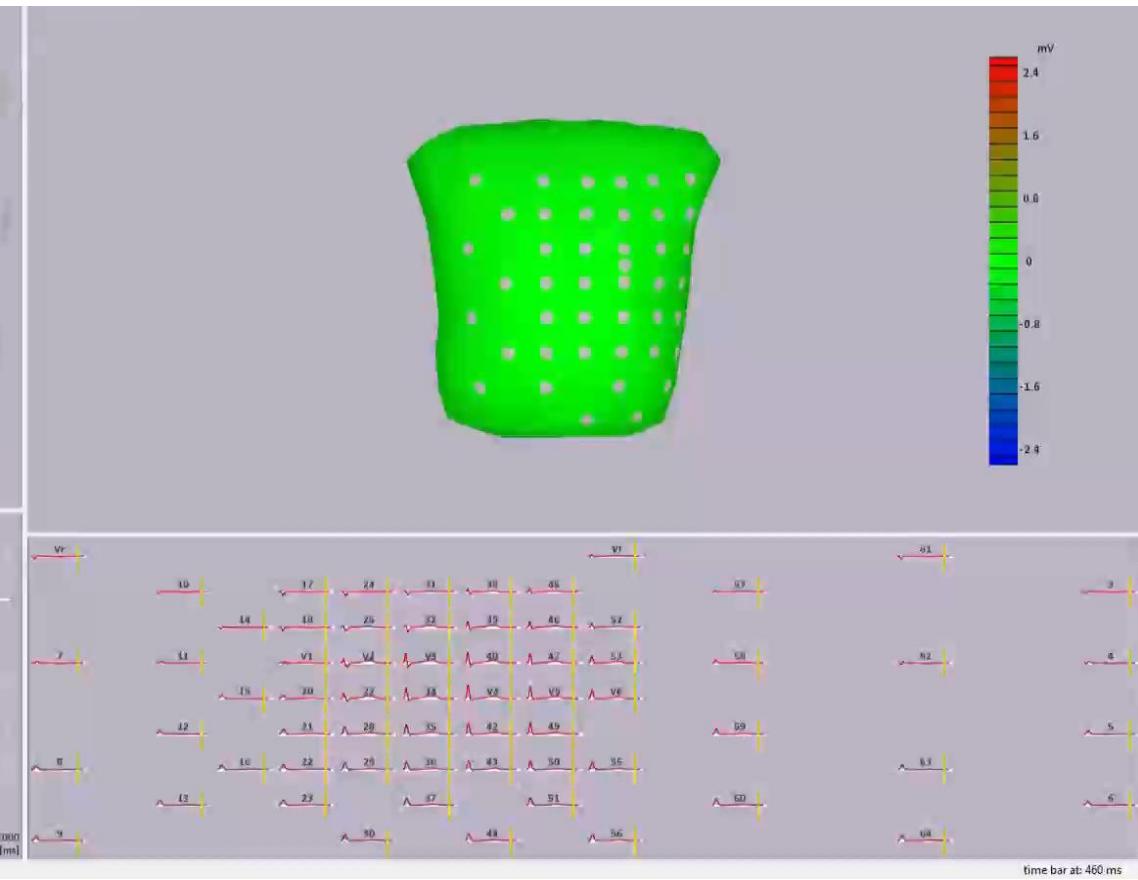
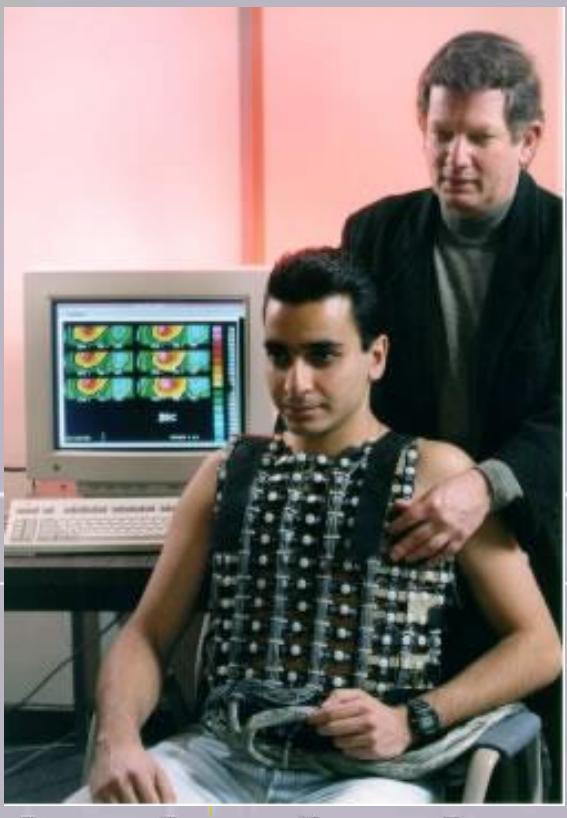
$$u_e(\vec{r}_e, t) = \frac{-\gamma}{4\pi\sigma_e} \left[\iiint_{V_{cor}} \frac{\hat{\sigma}_i \vec{\nabla} u_m \cdot \vec{e}_r}{r_s^2} dV_{cor} + \iint_{S_{piel}} u_e(\vec{r}_{piel}, t) \vec{\nabla} \left(\frac{1}{r_{piel}} \right) \cdot \vec{e}_{n,piel} dS_{piel} + \sum_{i,j} \iint_{S_{ij}} (\hat{\sigma}_i - \hat{\sigma}_j) u_e(\vec{r}_{ij}, t) \vec{\nabla} \left(\frac{1}{r_{ij}} \right) \cdot \vec{e}_{n,ij} dS_{ij} \right]$$

Simulación del ECG (anatomía realista)



$$u_e(\vec{r}_e, t) = \frac{-\gamma}{4\pi\sigma_e} \left[\iiint_{V_{cor}} \frac{\hat{\sigma}_i \vec{\nabla} u_m \cdot \vec{e}_r}{r_s^2} dV_{cor} + \iint_{S_{piel}} u_e(\vec{r}_{piel}, t) \vec{\nabla} \left(\frac{1}{r_{piel}} \right) \cdot \vec{e}_{n,piel} dS_{piel} + \sum_{i,j} \iint_{S_{ij}} (\hat{\sigma}_i - \hat{\sigma}_j) u_e(\vec{r}_{ij}, t) \vec{\nabla} \left(\frac{1}{r_{ij}} \right) \cdot \vec{e}_{n,ij} dS_{ij} \right]$$

Simulación del BSPM (anatomía realista)



$$u_e(\vec{r}_e, t) = \frac{-\gamma}{4\pi\sigma_e} \left[\iiint_{V_{cor}} \frac{\hat{\sigma}_i \vec{\nabla} u_m \cdot \vec{e}_r}{r_s^2} dV_{cor} + \iint_{S_{piel}} u_e(\vec{r}_{piel}, t) \vec{\nabla} \left(\frac{1}{r_{piel}} \right) \cdot \vec{e}_{n,piel} dS_{piel} + \sum_{i,j} \iint_{S_{ij}} (\hat{\sigma}_i - \hat{\sigma}_j) u_e(\vec{r}_{ij}, t) \vec{\nabla} \left(\frac{1}{r_{ij}} \right) \cdot \vec{e}_{n,ij} dS_{ij} \right]$$

Conclusiones (1)

- El ECG es el registro eléctrico obtenido con electrodos cutáneos (situados sobre la piel) que refleja la actividad eléctrica del corazón.
- Durante la despolarización del corazón, el miocardio es “barrido” por un frente de onda de despolarización que sigue un determinado recorrido. Esto ocurre de manera clara durante la activación de las aurículas (frente de onda de despolarización auricular) y la activación de los ventrículos (frente de onda de despolarización ventricular). Durante las respectivas fases de repolarización auricular y ventricular, no existe tal frente de onda porque el fenómeno es más volumétrico, pero aun así se supondrá que, de forma aproximada, las fases de repolarización respectivas pueden asociarse a la propagación de un frente de onda igual que las fases de despolarización.
- De acuerdo con la equivalencia demostrada en el Tema 15, la propagación de los frentes de onda mencionados genera un potencial extracelular similar al que generaría un frente de dipolos elementales distribuidos en la superficie del frente de onda.
- En cada instante de tiempo (instante en el que el frente de onda ocupa una cierta superficie en el seno del miocardio llamada “superficie isócrona”), la integral de la distribución de dipolos elementales resulta igual a un dipolo integrado llamado DIPOLO CARDIACO o VECTO DEL CORAZÓN (o términos similares) que sintetiza la actividad eléctrica instantánea del órgano.
- El vector del corazón o dipolo cardiaco es directamente proporcional al vector superficie del frente de onda en un instante dado:

$$\mathbf{P} = \gamma \sigma_i V_{pp} \mathbf{S}_{iso}$$

- Si asignamos al vector del corazón un origen fijo, situado en el centro geométrico del órgano, se denomina VECTOCARDIOGRAMA (VCG) al lugar geométrico de los extremos del vector del corazón en su evolución temporal durante el ciclo cardiaco. El VCG consiste por tanto en una curva en el espacio tridimensional constituida por los puntos por los que ha ido pasando el extremo del vector en su recorrido durante el ciclo cardiaco.
- El VCG está formado por tres lazos o “asas”. El “lazo P” corresponde al recorrido de los extremos del vector durante la despolarización auricular. El “lazo QRS” corresponde al recorrido de los extremos del vector durante la despolarización ventricular. Por último, El “lazo T” corresponde al recorrido de los extremos del vector durante la repolarización ventricular. La repolarización auricular daría lugar a un lazo muy pequeño que queda confundido con el lazo QRS.
- El potencial extracelular en un punto determinado del medio extracelular es igual a la proyección del dipolo cardiaco sobre la dirección de un vector llamado “vector electrocardiográfico”, cuyo módulo, dirección y sentido dependen de la posición relativa del electrodo de medida respecto al corazón.

Conclusiones (2)

- De forma aproximada, el “vector electrocardiográfico” tiene un módulo tanto más pequeño cuantos más alejados del corazón estén los puntos de medida del potencial extracelular, tiene por dirección la de la recta que une el centro del órgano con el punto de medida, y su sentido es desde el corazón hacia el punto de medida.
- El ECG en derivación AB, definido como la diferencia de potencial existente entre dos puntos A y B, es igual a la proyección del dipolo cardíaco sobre la dirección de un vector llamado “vector de derivación AB”, cuyo módulo, dirección y sentido dependen de la posición relativa de los puntos A y B respecto al corazón.
- El resultado de proyectar el lazo P del VCG sobre el vector electrocardiográfico es la aparición de una onda en la señal del potencial extracelular llamada onda P, que refleja por tanto la despolarización de las aurículas.
- El resultado de proyectar el lazo QRS del VCG sobre el vector electrocardiográfico es la aparición de una, dos o tres ondas en la señal del potencial extracelular llamadas ondas Q, R y S, que constituyen el llamado “complejo QRS” y reflejan por tanto la despolarización de los ventrículos. El hecho de que puedan aparecer hasta tres ondas (o más de tres en casos patológicos) se debe a la fuerte torsión del lazo QRS en el espacio tridimensional).
- La onda R se define como la primera onda positiva del complejo QRS; la onda Q se define como la onda negativa inmediatamente anterior a la R (si existe dicha onda negativa), y la onda S se define como la onda negativa inmediatamente posterior a la R (si existe dicha onda negativa). En caso de haber alguna deflexión positiva secundaria a la onda R, la onda se denomina onda R'. Si solo existe una onda negativa, se le asigna el nombre “onda QS”.
- Si el pico (valor máximo) de una onda es inferior a 1/3 del pico de la onda mayor, se le asigna letra negativa.
- El resultado de proyectar el lazo T del VCG sobre el vector electrocardiográfico es la aparición de una onda en la señal del potencial extracelular llamada onda T, que refleja por tanto la repolarización de los ventrículos.
- En el caso de que los puntos A y B equidistan del corazón, el “vector de derivación AB” tiene por dirección la de la recta que une los puntos A y B y su sentido es desde el punto B (terminal negativo de la medida diferencial) hacia el punto A (terminal positivo).
- En el caso de que el punto A esté muy cerca del corazón y el punto B esté muy alejado del mismo, el “vector de derivación AB” tiene por dirección la de la recta que une el centro del corazón con el punto A y su sentido es desde el corazón hacia el punto A.
- Las “derivaciones estándar” (I, II y III) y las “derivaciones aumentadas” (aVR, aVL y aVF) se corresponden de manera aproximada con el caso de dos puntos AB equidistantes.
- Las “derivaciones precordiales” (V1, V2, ..., V6) se corresponden de manera aproximada con el caso de un punto muy cercano y un punto muy alejado.

Bibliografía

- El dipolo cardíaco y el VCG
 - Capítulo 8 de [3] (punto 8.7)
- El ECG como proyección del dipolo cardíaco
 - Capítulo 8 de [3] (punto 8.8)
 - Capítulo 15 de [2] (punto 15.2)
- Derivaciones electrocardiográficas
 - Capítulo 8 de [3] (punto 8.9)
 - Capítulo 9 de [2] (puntos 9.3.1, 9.3.2 y 9.3.3)
 - Capítulo 15 de [2] (puntos 15.1, 15.3, 15.4 y 15.5)

[1] Bioelectricity. A quantitative approach. R Plonsey & R Barr. Ed. Springer, 2007

[2] Bioelectromagnetism. J Malmivuo & R Plonsey. Ed. Oxford University Press, 1995

[3] Bioelectrónica. Señales bioeléctricas. JM Ferrero, JM Ferrero, J Saiz & A Arnau Ed. SP-UPV, 1994

Bibliografía

- Potencial generado por un monopolo y un dipolo de corriente
 - Capítulo 2 de [1] (puntos 2.6, 2.7 y 2.8)
 - Capítulo 8 de [2] (puntos 8.2.1 y 8.2.2)
 - Capítulo 7 de [3] (Apéndice 7.2)
- Potenciales extracelulares generados por un axón mielinizado
- Potenciales extracelulares generados por un axón amielínico
 - Capítulo 8 de [1] (punto 8.2.3)
 - Capítulo 8 de [2] (punto 8.2.3)
 - Capítulo 7 de [3] (puntos 7.3, 7.4 y 7.5) (el análisis se realiza desde un enfoque diferente)
- Interpretación de dipolos
 - Capítulo 8 de [1] (punto 8.2.6)
 - Capítulo 7 de [3] (punto 7.4.2)
- El EEG
 - Capítulo 13 de [2] (todo el capítulo)

[1] Bioelectricity. A quantitative approach. R Plonsey & R Barr. Ed. Springer, 2007

[2] Bioelectromagnetism. J Malmivuo & R Plonsey. Ed. Oxford University Press, 1995

[3] Bioelectrónica. Señales bioeléctricas. JM Ferrero, JM Ferrero, J Saiz & A Arnau Ed. SP-UPV, 1994