



Mecanismo da pluma β e sua aplicação ao sistema da Corrente e Contracorrente dos Açores

4.^{as} Jornadas de Engenharia Hidrográfica, Instituto Hidrográfico,
21-23 de junho de 2016,
CMG Carlos Lopes da Costa, Escola Naval / CINAV



SERVIR PORTUGAL NO MAR

O sistema da Frente dos Açores, a Corrente dos Açores (CA) e a Contracorrente dos Açores (CCA) como estruturas relevantes:

- No giro subtropical do Atlântico Norte.
- No espaço marítimo de Portugal.

Daí o interesse em aprofundar o conhecimento e ver de vantagens para uso do mar.

Tentativa de explicação consistente da Corrente dos Açores (CA) e da Contracorrente dos Açores (CCA) pelos mecanismos de:

- Pluma β^* topográfica.
- Pluma β planetária.

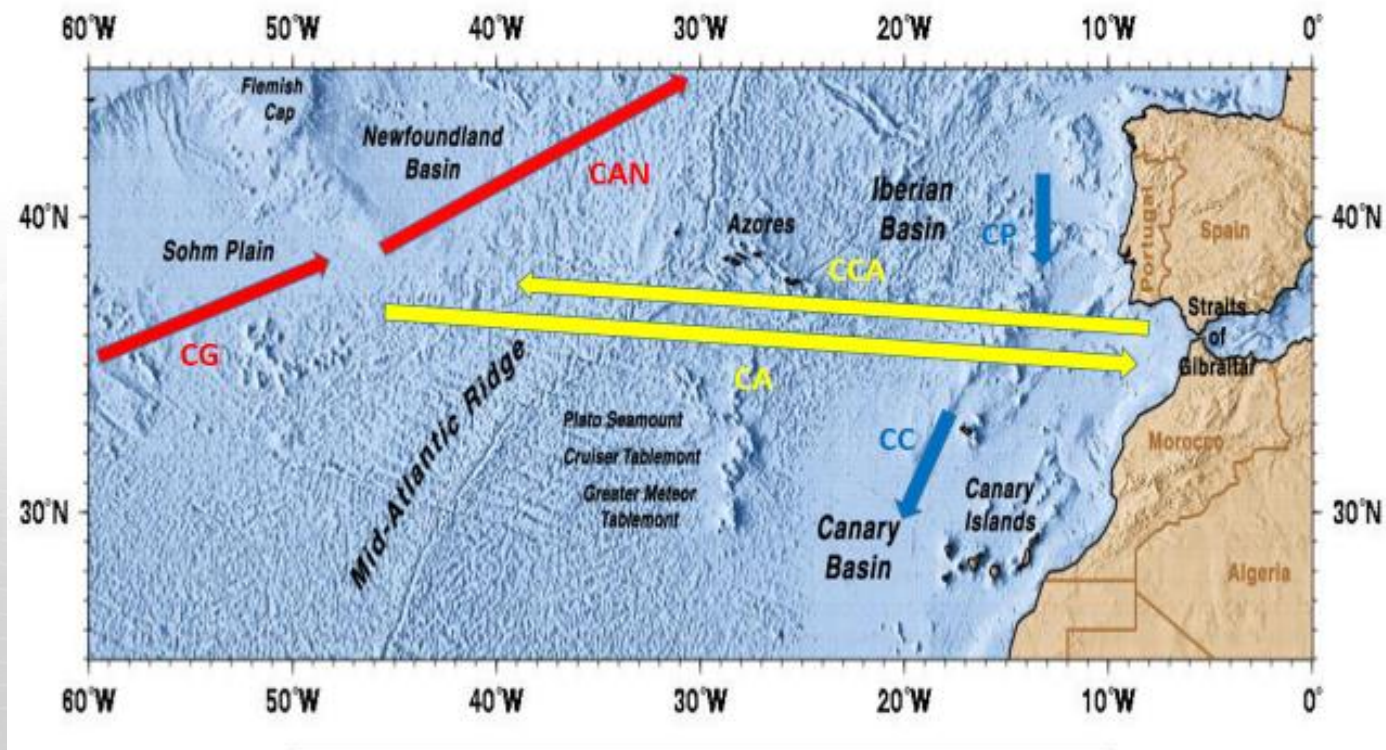
- **Introdução**

- Leis físicas aplicáveis
- Estimativas de transporte pela relação de Sverdrup
 - Com β planetário
 - Com β^* topográfico
- Pluma β planetária com dois ramos zonais
- Conservação de vorticidade potencial e ondas Rossby
- Ondas Rossby e alongamento das plumas β e β^*
- Ligação da pluma β^* topográfica à pluma β planetária
- Corrente dos Açores (CA) e Contracorrente dos Açores (CCA)
- Conclusão

- A CA como ramo da Corrente do Golfo (CG):
 - Separa-se da CG ao largo dos Grandes Bancos da Terra Nova.
 - Atravessa a bacia oceânica até golfo de Cádiz.
- Corrente baroclínica associada à Frente da Corrente dos Açores:
 - No lado polar da água modal subtropical de 18° C.
- Tem variabilidade de mesoescala, gera meandros e *eddies* (ondas e vórtices).
- Caudal para E com 7 a 13 Sv, entre 32° e 36° N, centrado na latitude de Gibraltar. Velocidades $> 0,1$ m/s.
- Três ramos para SE com ligação à Corrente das Canárias e à Corrente Equatorial Norte.

- No golfo de Cádis:
 - Troca de massa entre o Mediterrâneo e o Atlântico => incorporação de água atlântica no fluxo descendente da água mediterrânica => fonte de vorticidade potencial.
 - Circulação ciclónica na ligação entre a CA e a CCA.
- A CCA, a N da CA, a fluir para W, com 2 a 8 Sv, entre 37° e 38° N, até ~ 800 m.

Esquemas da Corrente dos Açores e da Contracorrente dos Açores



- Introdução
- **Leis físicas aplicáveis**
- Estimativas de transporte pela relação de Sverdrup
 - Com β planetário
 - Com β^* topográfico
- Pluma β planetária com dois ramos zonais
- Conservação de vorticidade potencial e ondas Rossby
- Ondas Rossby e alongamento das plumas β e β^*
- Ligação da pluma β^* topográfica à pluma β planetária
- Corrente dos Açores (CA) e Contra Corrente dos Açores (CCA)
- Conclusão

- Cons. massa => eq. da continuidade: $\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$
- Cons. quant. mov. => relação geostrófica: $f v = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}$ e $f u = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y}$
- Relação de Sverdrup (eq. vort. geostrófica): $\beta v = f \frac{\partial w}{\partial z}$
- Aproximação do plano B:

$$f = f_0 + \beta \varphi, \quad f_0 = 2\omega \sin \varphi_0 \quad \text{e} \quad \beta = \frac{\partial f}{\partial \varphi} = \frac{2\omega \cos \varphi_0}{a}$$

- Geostrofia aplicada à camada superior de modelo de duas camadas:

$$f v_1 = g' \frac{\partial h_1}{\partial x} \quad ; \quad -f u = g' \frac{\partial h_1}{\partial y} \quad ; \quad g' = \frac{g(\rho_2 - \rho_1)}{\rho_1}$$

- Introdução
- Leis físicas aplicáveis
- **Estimativas de transporte pela relação de Sverdrup**
 - **Com β planetário**
 - **Com β^* topográfico**
- Pluma β planetária com dois ramos zonais
- Conservação de vorticidade potencial e ondas Rossby
- Ondas Rossby e alongamento das plumas β e β^*
- Ligação da pluma β^* topográfica à pluma β planetária
- Corrente dos Açores (CA) e Contra Corrente dos Açores (CCA)
- Conclusão

Estimativas de transporte pela relação de Sverdrup: com β planetário

- Análise de escala da eq. continuidade:

$$W \ll \frac{UH}{L} \quad (\text{para } L \gg H)$$

- Análise de escala da relação de Sverdrup ($\beta v = f \frac{\partial w}{\partial z}$):

$$W = \frac{\beta UH}{f_0}$$

- Estimativa para relação entre transportes horizontal (U) vs vertical (W):

$$\frac{U}{W} = \frac{f_0}{\beta H} = \frac{8,57 \times 10^{-5}}{1,85 \times 10^{-11} \times 1.000} \approx 4.630 \Rightarrow \text{exagerado!}$$

Dissipação por atritos na margem oriental são importantes => ter em conta os efeitos de batimetria (plataforma e talude continentais).

- $\beta^* \equiv f_0 \frac{\alpha}{H}$ α = declive do fundo H = espessura média da camada superior

- Relação de transportes (U/W) adaptada a β^* : $\frac{U}{W} = \frac{f_0}{\beta^* L_y}$

L_y = dimensão meridional da perda de massa ~ 30 km

$$\beta^* \equiv f_0 \frac{\alpha}{H} = 8,57 \times 10^{-5} \times \frac{0,01}{1.000} = 8,57 \times 10^{-10} s^{-1} m^{-1} \text{ com } H = 1.000 \text{ m}$$

$$\frac{U}{W} = \frac{f_0}{\beta^* L_y} = \frac{8,57 \times 10^{-5}}{8,57 \times 10^{-10} \times 30 \times 10^3} = 3,33 \Rightarrow \text{realista}$$

A perda de 2 Sv na vertical seria compensada, na horizontal, com fluxo para o sumidoiro, pela CA, de cerca de 7 Sv, e o excesso de 5 Sv disponível para fluir de volta ao oceano aberto pela Corrente da Vertente (CV) e pela CCA. Também ~ 1 Sv para dentro do Mediterrâneo (*inflow*).

- Introdução
- Leis físicas aplicáveis
- Estimativas de transporte pela relação de Sverdrup
 - Com β planetário
 - Com β^* topográfico
- **Pluma β planetária com dois ramos zonais**
 - Conservação de vorticidade potencial e ondas Rossby
 - Ondas Rossby e alongamento das plumas β e β^*
 - Ligação da pluma β^* topográfica à pluma β planetária
 - Corrente dos Açores (CA) e Contra Corrente dos Açores (CCA)
 - Conclusão

Com:

- $-fv = -g' \frac{\partial \eta}{\partial x}$ $fu = -g' \frac{\partial \eta}{\partial y}$ (geostrofia)
- $f = f_0 + \beta y$ (aprox. plano B),
- $\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{W_d}{H}$ (a continuidade),
- $v = \frac{f}{\beta H} W_d$ (a relação de Sverdrup),

e assumindo β e H não variáveis em y , chega-se a:

$$u = -\frac{1}{\beta f H} \int_x^{x_e} \frac{\partial}{\partial y} (f^2 W_d(x', y)) dx'$$

Com uma perda de massa descendente, w_d , que aumente com a latitude, y , até atingir um máximo seguido de decréscimo, a velocidade zonal é para leste a sul do máximo negativo (associar à CA) e para oeste a norte do máximo negativo (associar à CCA).

Integrando entre as latitudes y_1 e y_2 de modo a incluir os dois jatos zonais:

$$\int_{y_1}^{y_2} uH \, dy = \int_{y_1}^{y_2} \int_x^{x_e} -w_d \, dx \, dy - \frac{1}{\beta} \int_x^{x_e} f[w_d(y_2) - w_d(y_1)] \, dx$$

$\int_{y_1}^{y_2} \int_x^{x_e} -w_d \, dx \, dy \Leftrightarrow$ transporte zonal equivalente à perda de massa, na vertical (conservação de massa).

$-\frac{1}{\beta} \int_x^{x_e} f[w_d(y_2) - w_d(y_1)] \, dx \Leftrightarrow$ transporte de recirculação adicional (conservação de VP).

Efeito de conservação de VP >> efeito de conservação de massa

- Introdução
- Leis físicas aplicáveis
- Estimativas de transporte pela relação de Sverdrup
 - Com β planetário
 - Com β^* topográfico
- Pluma β planetária com dois ramos zonais
- **Conservação de vorticidade potencial e ondas Rossby**
- Ondas Rossby e alongamento das plumas β e β^*
- Ligação da pluma β^* topográfica à pluma β planetária
- Corrente dos Açores (CA) e Contra Corrente dos Açores (CCA)
- Conclusão

$$\frac{d}{dt}(\zeta + f) = -(\zeta + f) \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{1}{\rho^2} \left(\frac{\partial \rho}{\partial x} \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{\partial \rho}{\partial y} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y} \right)$$

$\frac{d}{dt}(\zeta + f)$ = alteração da vorticidade absoluta

As maneiras de gerar ou alterar a vorticidade:

- $-(\zeta + f) \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)$ = termo de divergência / *vortex stretching*
- $\left(\frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial x} \right)$ = termo de inclinação (gradientes de velocidades)
- $\frac{1}{\rho^2} \left(\frac{\partial \rho}{\partial x} \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{\partial \rho}{\partial y} \frac{\partial p}{\partial x} \right)$ = termo baroclínico (inclinação de isopícnicas)
- $\left(\frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y} \right)$ = termo de atrito

- VP é medida de rotação.
- VP combina:
 - Rotação da Terra => vorticidade planetária => $\mathbf{f} = 2 \omega \sin \phi \mathbf{k}$
 - Rotação de partículas de fluido em torno de si próprias => vorticidade relativa => $\boldsymbol{\zeta} = \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \mathbf{k}$
 - Efeitos de estratificação => inclinação e separação de superfícies isentrópicas => N (frequência de Brunt-Vaissala) e espessuras de camadas (h)
 - Variação da batimetria ou profundidade => H
- A VP tende a ser conservada => se perturbação local de VP resulta propagação de anomalias de VP ou ondas Rossby (planetárias ou topográficas) ao longo de isolinhas de VP

Pressupostos:

- Pequeno número de Rossby => o termo de Coriolis importante.
- A escala horizontal do movimento da ordem do raio de deformação => mesoescala
- As variações de profundidade pequenas comparativamente à profundidade média.
- As variações de estratificação pequenas comparativamente à estratificação ambiental média.
- As variações do parâmetro de Coriolis pequenas.

No contexto de movimentos de mesoescala no oceano a aproximação quase-geostrófica é mais realista do que a geostrófica.

- Resultam da conservação de VP quase-geostrófica.
- Geradas por:
 - Instabilidades dinâmicas.
 - Interações do escoamento com relevo do fundo.
 - Fontes locais de vorticidade:
 - Rotacional do vento.
 - Convergências/divergências horizontais (*vortex stretching/squashing*).
- Força restauradora de propagação:
 - O efeito β planetário:
 - Movimento para N/S gera vorticidade relativa **positiva**/**negativa** => velocidade de fase para W.
 - Velocidade de grupo para W se mais longas e para E se menos longas.
 - O efeito β^* topográfico.
 - Movimento para **maior**/**menor** profundidade gera vorticidade relativa **positiva**/**negativa** => velocidade de fase com linha de costa à **direita**/**esquerda** no HN/HS.
 - Velocidade de grupo com a costa à direita/esquerda no HN/HS se mais longas; e com a costa à esquerda/direita no HN/HS se menos longas.
- São parte essencial dos movimentos de mesoescala (*eddies*, meandros e vórtices).
- Estruturas verticais barotrópicas ou baroclínicas.

Conservação de VPQG em duas camadas:

$$\frac{\partial}{\partial t} [\nabla^2 p_1' + F_1(p_2' - p_1')] + \beta \frac{\partial p_1'}{\partial x} = 0 \quad \text{e} \quad \frac{\partial}{\partial t} [\nabla^2 p_2' + F_2(p_1' - p_2')] + \beta \frac{\partial p_2'}{\partial x} = 0$$

$$F_1 = \frac{f_0^2}{gh_1} \quad \text{e} \quad F_2 = \frac{f_0^2}{gh_2} ; k_d = \sqrt{F_1 + F_2} \quad (\text{inverso do raio de deformação})$$

Relações de dispersão e velocidades de fase:

- $\omega_0 = \frac{-\beta k}{k^2 + l^2}$ e $c_{px0} = \frac{\omega_0}{k} = \frac{-\beta}{k^2 + l^2}$ (modo barotrópico)
- $\omega_1 = \frac{-\beta k}{k^2 + l^2 + F_1 + F_2}$ e $c_{px1} = \frac{\omega_1}{k} = \frac{-\beta}{k^2 + l^2 + F_1 + F_2}$ (modo baroclínico)

Velocidades de fase sempre para W

Velocidades de grupo:

- Ondas menos longas para E
- Ondas mais longas para W

- Introdução
- Leis físicas aplicáveis
- Estimativas de transporte pela relação de Sverdrup
 - Com β planetário
 - Com β^* topográfico
- Pluma β planetária com dois ramos zonais
- Conservação de vorticidade potencial e ondas Rossby
- **Ondas Rossby e alongamento das plumas β e β^***
- Ligação da pluma β^* topográfica à pluma β planetária
- Corrente dos Açores (CA) e Contra Corrente dos Açores (CCA)
- Conclusão

Sumidoiro localizado de massa e geração de vorticidade e circulação ciclônicas

Entra ~ 1 Sv de água superficial atlântica para o Mediterrâneo.

Sai, em subsuperfície ~ 1 Sv de *Mediterranean Outflow Water* (MOW), por Gibraltar, para Atlântico:

- => A MOW, por mistura, incorpora mais ~ 1-2 Sv do oceano superior.
- => Desce, por densidade, até equilíbrio em ~1.100 m.
- => Perda de massa do oceano superior para inferior.
- => Convergência horizontal no oceano superior no golfo de Cádiz.
- => *Vortex stretching* (termo da divergência da eq. geral da vorticidade) nos 300-600 m.
- => Fonte de vorticidade relativa positiva.
- => Circulação ciclônica no golfo (zona da perda de massa).
- ⇒ Na ausência de efeito β seria circular.
- ⇒ No talude, com efeito β^* topográfico e ondas Rossby topográficas, o vórtice alonga orientado com a batimetria a partir da fonte.
- => No mar aberto, com efeito β e ondas Rossby planetárias, o vórtice alonga para W a partir da fonte.

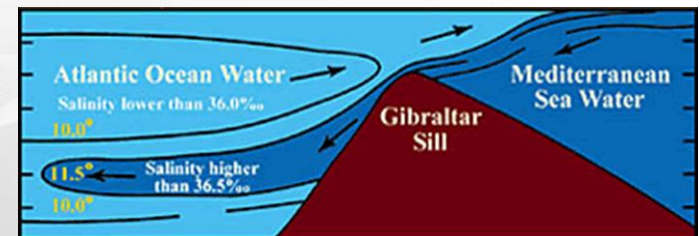
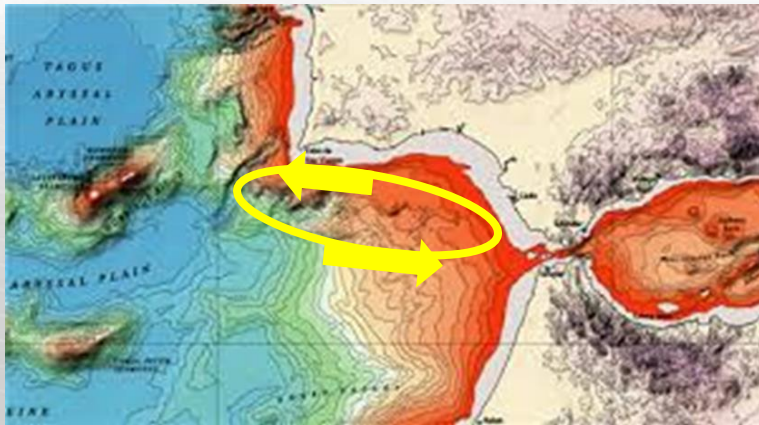
- Ondas Rossby topográficas:
 - Desenvolvem, a partir da fonte de vorticidade, plumas de circulação quase estacionárias orientadas com a batimetria \Leftrightarrow **anisotropização segundo a batimetria.**
- Ondas Rossby planetárias longas:
 - Propagam energia para W.
 - São ativas a produzir «plumas beta» i.e. células de circulação quase estacionárias, estendendo-se para W do ponto de geração \Leftrightarrow **anisotropização ao longo de paralelos de latitude.**

Simulações numéricas e bibliografia diversa mostram as anisotropias das plumas por efeito β ou ondas Rossby, por exemplo: Kamenkovich *et al.* 1986, Ozgokmen *et al.* 2001, Volkov *et al.* 2010, Kida *et al.* 2008 e Wang *et al.* 2014.

Mas, não encontrada nos livros de dinâmica oceânica uma inequívoca explicação para isso!

O oceano superior responde ao forçamento de vorticidade, induzido pela MOW:

=> Cria pluma β^* topográfica, mais ou menos alinhada com a batimetria, na região do talude continental, com transporte várias vezes superior ao da MOW.



- Introdução
- Leis físicas aplicáveis
- Estimativas de transporte pela relação de Sverdrup
 - Com β planetário
 - Com β^* topográfico
- Pluma β planetária com dois ramos zonais
- Conservação de vorticidade potencial e ondas Rossby
- Ondas Rossby e alongamento das plumas β e β^*
- **Ligação da pluma β^* topográfica à pluma β planetária**
- Corrente dos Açores (CA) e Contra Corrente dos Açores (CCA)
- Conclusão

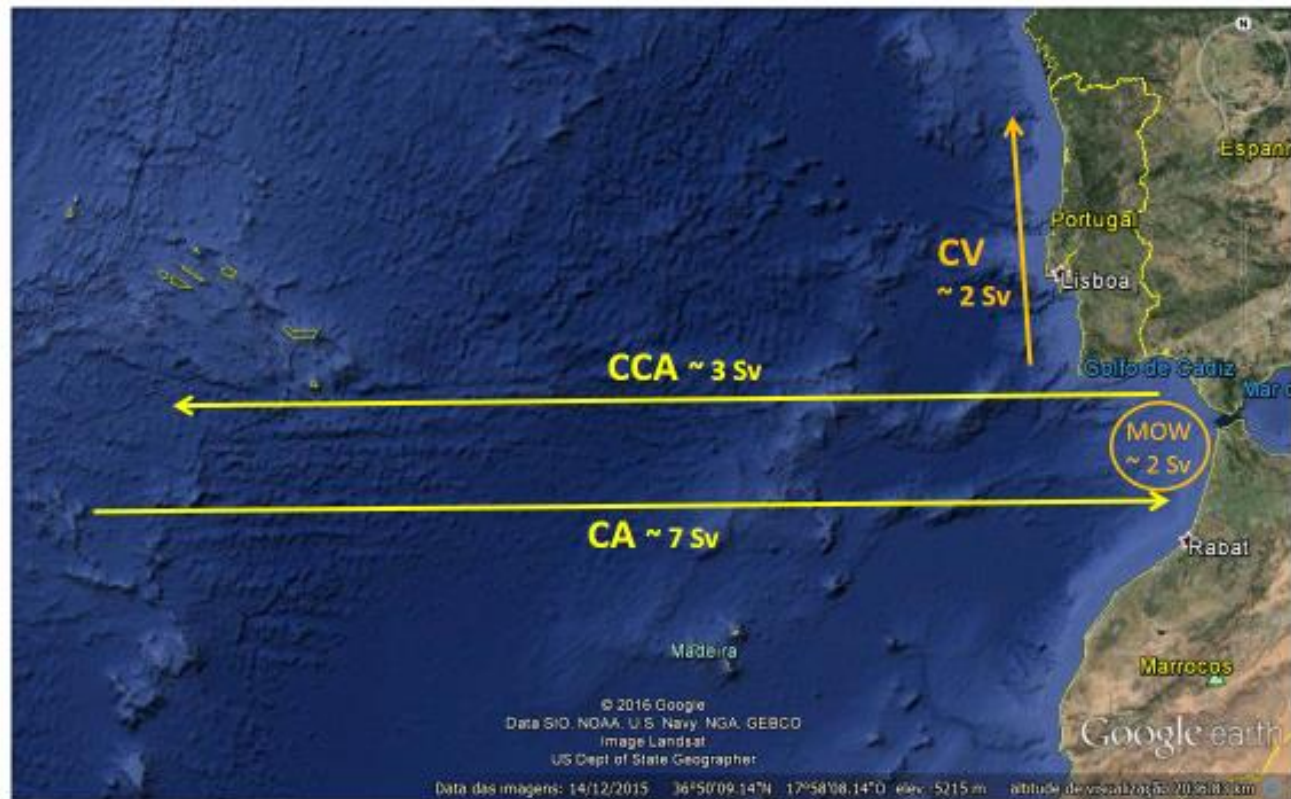
Ligação da pluma β^* topográfica à pluma β planetária

Fatores para a pluma β^* topográfica ligar ao interior, na dimensão de bacia oceânica:

- A alteração do declive do fundo.
- Viscosidade negativa (transferência de energia turbulenta para o escoamento médio) dos *eddies* de mesoescala:
 - *Meddies* ao largo do cabo de São Vicente viabilizam que o escoamento da pluma β^* topográfica atravesse a batimetria para o largo profundo e adquira o alinhamento zonal consistente com a pluma β planetária.

- Introdução
- Leis físicas aplicáveis
- Estimativas de transporte pela relação de Sverdrup
 - Com β planetário
 - Com β^* topográfico
- Pluma β planetária com dois ramos zonais
- Conservação de vorticidade potencial e ondas Rossby
- Ondas Rossby e alongamento das plumas β e β^*
- Ligação da pluma β^* topográfica à pluma β planetária
- **Corrente dos Açores (CA) e Contra Corrente dos Açores (CCA)**
- Conclusão

Corrente e Contracorrente dos Açores



- Introdução
- Leis físicas aplicáveis
- Estimativas de transporte pela relação de Sverdrup
 - Com β planetário
 - Com β^* topográfico
- Pluma β planetária com dois ramos zonais
- Conservação de vorticidade potencial e ondas Rossby
- Ondas Rossby e alongamento das plumas β e β^*
- Ligação da pluma β^* topográfica à pluma β planetária
- Corrente dos Açores (CA) e Contra Corrente dos Açores (CCA)
- **Conclusão**

- O fluxo de água descendente de água mediterrânica (MOW), a criar anomalia de vorticidade positiva, de que resultam ondas Rossby e circulação ciclónica.
- Talude continental do golfo de Cádiz a proporcionar a propagação de ondas Rossby topográficas e o desenvolvimento de pluma β^* topográfica orientada com a batimetria.
- A variabilidade da batimetria e a viscosidade negativa dos *eddies* a desviarem o escoamento da pluma β^* topográfica para o largo profundo (anisotropização).
- A pluma β planetária estendida para ocidente, na dimensão de bacia oceânica, por efeito β e ondas Rossby => a ligar com a CG a ocidente.