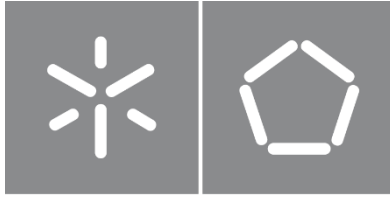




Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Guilherme Scatolini Menten

**Modelação dos Impactos das Alterações
Climáticas na Intrusão Salina do Estuário
do Rio Minho**



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Guilherme Scatolini Menten

**Modelação dos Impactos das Alterações
Climáticas na Intrusão Salina do Estuário
do Rio Minho**

Dissertação de Mestrado
Mestrado em Engenharia Urbana

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor José Luís da Silva Pinho

DECLARAÇÃO

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores



Atribuição

CC BY

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Agradecimentos

Agradeço a minha família por todo apoio que tive ao decorrer desse trabalho, em tempos difíceis de pandemia. À minha esposa, por ter a coragem de se aventurar comigo em outro país, com um filho, João, de dois meses no colo, em busca de novos conhecimentos e vivências. Aos meus pais, pelo apoio, mesmo que a distância, e pela tranquilidade de saber que, mesmo que nossos planos não dessem certo, eu poderia contar com eles e ter um lugar seguro para dar um passo atrás, se necessário. Somente com ajuda deles pude me concentrar em realizar o presente trabalho.

Agradeço também ao projeto EsCo-Ensembles (PTDC/ECI-EGC/30877/2017), cofinanciado por NORTE2020, Portugal 2020 e a União Europeia através do ERDF, e FCT através de fundos nacionais, cujos financiamentos apoiaram a criação do modelo utilizado, assim como de parte dos dados.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Resumo

Entre os impactos esperados das alterações climáticas estão a intensificação do aumento do nível médio do mar e a alteração dos padrões pluviométricos regionais. Os estuários estão entre as zonas mais vulneráveis a esses efeitos, sendo assim necessário entender os impactos nos mesmos para melhor planejar ações de mitigação e aumento da resiliência.

Neste trabalho foi aplicada modelação numérica, através do software Delft3D, para simular os efeitos na intrusão salina do estuário do Rio Minho sob os cenários RCP4.5 e RCP8.5, adotados pelo IPCC. Os caudais fluviais são regulados por diversas barragens, sendo influenciados apenas de forma indireta pelas alterações nos padrões pluviométricos. Assim, foi estudada a variação dos caudais de modo a apoiar futuras ações de planeamento e eventuais revisões das regras de operação dessas barragens para limitar a intrusão salina.

Verificou-se o aumento da intrusão salina a montante do estuário com o aumento do nível do mar e a diminuição dos caudais fluviais chegando, no pior caso, à extensão de 28,9 km a partir da foz do estuário, o que poderá implicar com os usos da água nesta região.

A extensão da intrusão salina apresenta maior dependência em relação às variações de caudal em situações de seca. Assim, nos casos mais críticos, ou seja, com maior intrusão salina, o caudal fluvial demonstrou ser o fator de maior importância, sendo a sua regularização uma ferramenta de controlo da extensão da intrusão salina no estuário.

Palavras chave: Alterações climáticas; Delft3D, Estuário do Rio Minho, Intrusão salina.

Abstract

Among the expected impacts of climate change are the increased mean sea level rise and the changes in regional rainfall patterns. Estuaries are among the most vulnerable areas to these effects, so it is necessary to understand their impacts to better plan mitigation actions and increase resilience.

Numerical modeling was applied in this work, using the Delft3D software, to simulate the effects of saline intrusion in the Minho River estuary under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios adopted by the IPCC. In this case, the river's flow is regulated by several dams, and the flow that reaches the estuary is only indirectly influenced by changes in rainfall patterns. Thus, the variation of river flows was studied in order to support future planning actions and revision of the dam discharges rules that should be followed to control salt intrusion.

An increase in salt intrusion was observed at the upstream estuary with an increase in the sea level and the decrease in river flows reaching, in the worst case, the extension of 28.9 km from the estuarine mouth, which can bring several impacts to the different water uses in the region.

The extent of salt intrusion showed a greater dependence on river flows variations under drought conditions. Thus, in the most critical cases, that is, with greater salt intrusion, the river flow proved to be the most important factor, and its control is an efficient tool to limit the extent of salt intrusion in the estuary.

Keywords: Climate change; Delft3D, Minho River Estuary, Salt Intrusion.

Índice

1.	Introdução	1
1.1.	Objetivos	1
2.	Estado do conhecimento	3
2.1.	Estuários	3
2.1.1.	Hidrodinâmica	3
2.1.2.	Morfodinâmica	6
2.1.3.	Salinidade	8
2.2.	Alterações climáticas	9
2.3.	Modelação numérica	11
3.	Metodologia	13
3.1.	Área de estudo	13
3.2.	Modelo	14
3.3.	Pontos de observação	18
3.4.	Definição de cenários	19
3.5.	Referencial para comparação dos resultados	21
4.	Resultados	23
4.1.	Cenários sem elevação do nível médio do mar	23
4.2.	Cenários com elevação do nível do mar e caudal reduzido	26
4.3.	Cenários com elevação do nível do mar e caudal de cheia	27
4.4.	Simulações da variação do caudal para o RCP8.5 em 2100	28
4.5.	Análise e discussão	29
5.	Conclusões e sugestões para desenvolvimentos futuros	32
6.	Referências Bibliográficas	34
	Apêndice A – Configurações do modelo	38
	Apêndice B – Figuras e mapas dos resultados	41

Índice de Figuras

Figura 1. Extensão do modelo numérico.....	14
Figura 2. Grelha utilizada no modelo.	15
Figura 3. Batimetria do estuário. a) Jusante b) Montante	16
Figura 4. Perfis longitudinais em cenário com caudal de 325.82 m ³ /s e sem sobrelevação do nível do mar.	17
Figura 5. Localização dos pontos de observação.	19
Figura 6. Intrusão salina no cenário C1, caudal médio anual e aumento da elevação do nível médio de mar nulo.....	23
Figura 7. Intrusão salina no cenário C2, caudal médio da estação seca e aumento da elevação do nível médio de mar nulo.	24
Figura 8. Intrusão salina no cenário C2b, caudal de seca extrema sem aumento da elevação do nível médio do mar.	25
Figura 9. Intrusão salina no cenário C3, caudal médio da estação chuvosa e aumento da elevação do nível médio do mar nulo. a) Preia-mar b) Baixa-mar.....	25
Figura 10. Cenário 4, aumento do nível médio relativo ao RCP4.5 em 2050 (a) e 2100 (b).....	26
Figura 11. Resultados na área de transição entre água doce e oligo-halina no cenário 4. a) RCP4.5 2050 b) RCP4.5 2100	26
Figura 12. Resultados na área de transição entre água doce e oligo-halina no cenário 5. a) RCP8.5 2050 b) RCP8.5 2100	27
Figura 13. Resultados das simulações dos cenários com caudal de cheia. a) RCP4.5 2050 b) RCP4.5 2100 c) RCP8.5 2050 d) RCP8.5 2100.....	28
Figura 14. Extensão da intrusão salina em relação à foz das simulações para RCP8.5 2100 para diferentes caudais fluviais.	29

Índice de Tabelas

Tabela 1. Aumento do nível do mar para diferentes cenários.....	10
Tabela 2. Principais valores dos parâmetros de calibração utilizados no modelo...	18
Tabela 3. Cenários simulados para estudo.....	21
Tabela 4. Síntese de resultados das simulações em preia-mar.	30

1. Introdução

O clima do planeta está naturalmente em constante mudança. Além disso, nos últimos séculos, as ações antrópicas causaram diversos impactos no sistema climático. Uma das consequências é o aceleração do aquecimento global, que, por sua vez, leva a um aumento do nível médio do mar (IPCC, 2014). Outro efeito esperado são alterações nos padrões de precipitação, sendo essas não uniformes à escala global.

É evidente que, com alterações no sistema climático a nível global, os processos naturais serão afetados, sendo de especial interesse da humanidade aqueles que acontecem nas zonas costeiras onde se observou um rápido crescimento populacional e de atividades económicas no último século (Dangendorf et al., 2012).

De acordo com o IPCC (2014), mesmo nos cenários mais otimistas, é projetado um aumento das temperaturas globais. Assim, ressalta-se a importância de estudos dos efeitos locais das alterações climáticas, que possam apoiar a tomada de decisões de adaptação e aumento da resiliência.

Este trabalho estuda estes efeitos no estuário do rio Minho. Para isso, foi aplicado e desenvolvido um modelo numérico que permite avaliar o efeito das alterações climáticas nesse estuário, em específico, a subida do nível do mar e as alterações dos caudais fluviais, a partir de cenários que consideram as alterações climáticas na região estudada.

De forma mais específica, será avaliado o efeito das alterações climáticas no fenómeno da intrusão salina no estuário, para melhor entendê-lo em função das alterações tanto de nível do mar quanto dos caudais fluviais do rio Minho. Nesse sentido, constata-se que o rio em questão tem os seus caudais regulados pelas diversas barragens ao longo da sua bacia hidrográfica, tendo-se optado pelo estudo do efeito da variação dessas condições ao invés de recorrer a modelação hidrológica para estimar os caudais futuros prováveis.

1.1. Objetivos

O principal objetivo do trabalho é modelar o efeito das alterações climáticas no estuário do Rio Minho. Para isso, pretende-se:

- Estimar os efeitos das alterações climáticas nos caudais fluviais;

- Avaliar os efeitos das alterações dos caudais fluviais no estuário;
- Identificar riscos associados aos cenários críticos para a área, visando principalmente a intrusão salina no estuário.

2. Estado do conhecimento

Este trabalho assenta-se nas teorias da hidrodinâmica estuarina, das alterações climáticas e modelação numérica. Assim, apresenta-se, a seguir, o enquadramento teórico e trabalhos desenvolvidos nestes domínios.

2.1. Estuários

De um modo geral, existem diversas formas de definir os estuários, como discutido no trabalho de Elliott e McLusky (2002). Miranda et al. (2002) apresentam a definição utilizada por engenheiros como “a região interior de um ambiente costeiro, onde ocorre o encontro das águas fluviais com a do mar transportada pelas correntes de maré, estendendo-se rio acima até o limite da influência da maré”.

A *European Commission* (2012) caracteriza os estuários e as zonas costeiras como alguns dos ecossistemas mais produtivos do mundo, trazendo diversos benefícios ambientais e económicos. Constituem ainda locais ideais para a instalação de portos e estaleiros navais. Apontam também que estão entre as zonas mais vulneráveis às alterações climáticas.

Conforme Miranda et al (2002), os movimentos e misturas entre as massas de água de origem contrastantes, do rio e do mar, são comuns aos estuários. Resultam, assim, em massas de água não homogéneas, que apresentam grande variabilidade espacial e temporal.

Um estudo sobre mudanças ocorridas em zonas costeiras causadas pela atividade humana e pela variação climática de Cloern et al. (2016), apontou que os estuários são sistemas em que as diversas componentes estão interligadas e, por isso, medições simples como a salinidade e temperatura servem como indicadores importantes para avaliar alterações no ecossistema.

2.1.1. Hidrodinâmica

Em relação aos processos hidrodinâmicos que ocorrem nos estuários, Horrevoets et al. (2004) afirmam que os estuários são sistemas hidráulicos complexos, onde o fluxo e o nível de água no estuário são descritos pelas equações de Saint-Venant. Os autores apresentam no trabalho uma solução analítica que pode ser utilizada para

descrever a maré no estuário em casos em que o caudal do rio é comparável ao fluxo da maré.

Como expectável, os estuários estão sujeitos aos efeitos dos fluxos marinhos, principalmente da maré. Pinho (2000) afirma que as marés resultam da ação das forças gravitacionais dos astros sobre as massas de água, sendo o efeito correspondente à Lua e ao Sol a maior contribuição, sendo usual desprezar a contribuição dos restantes. O autor apresenta uma série de funções periódicas, ou componentes harmónicos, que separa em semi-diurnas, diurnas e de longo período. Apesar disso, efeitos locais como o vento e a pressão atmosférica podem causar desvios nas elevações da superfície oceânica (Pinho, 2000). Estes harmónicos serão utilizados pelo *software* Deft3D para modelar a maré, através da equação (2-1).

$$H(t) = A_0 + \sum_{i=1}^k A_i F_i \cos(\omega_i t + (V_0 + u)_i - G_i) \quad (2-2)$$

Em que

$H(t)$ é o nível da água no instante t ;

A_0 é o nível médio da água durante o período considerado;

K é o número de constituintes relevantes;

i é o índice do constituinte;

A_i é amplitude da maré local do constituinte i ;

F_i é o fator de amplitude nodal;

ω_i é a velocidade angular

$(V_0 + u)_i$ é o argumento astronómico;

G_i é o atraso de fase local.

Melet et al. (2020) afirmam que, apesar das observações por satélite serem importantes ferramentas na observação do nível do mar e das marés e ter um bom resultado no oceano, há limitações na observação das zonas costeiras. Assim, sugerem a utilização sinérgica de diferentes métodos de observação do nível do mar e de eventos extremos.

Em geral, para simular o movimento do fluído, recorre-se à teoria de Newton. Aplicando esse conceito à mecânica dos fluídos, chega-se às equações de Navier-Stokes

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho F_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2-2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \rho F_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (2-3)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \rho F_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (2-4)$$

em que

F_x , F_y e F_z são as componentes das forças de volume por unidade de massa (N/kg);

p é a pressão (Pa);

u é a componente da velocidade na direção x;

v é a componente da velocidade na direção y;

w é a componente da velocidade na direção z.

μ é o coeficiente de viscosidade dinâmico (kg/m·s)

A partir destas equações chega-se às equações de Reynolds que descrevem o movimento médio temporal de uma partícula de fluido (Pinho, 2000).

$$\rho \left(\frac{\partial \hat{u}}{\partial t} + \frac{\partial \hat{u}\hat{u}}{\partial x} + \frac{\partial \hat{u}\hat{v}}{\partial y} + \frac{\partial \hat{u}\hat{w}}{\partial z} \right) = \rho F_x - \frac{\partial \hat{p}}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 \hat{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \hat{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \hat{u}}{\partial z^2} \right) - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \overline{u'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \right) \quad (2-5)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \hat{v}}{\partial t} + \frac{\partial \hat{v}\hat{u}}{\partial x} + \frac{\partial \hat{v}\hat{v}}{\partial y} + \frac{\partial \hat{v}\hat{w}}{\partial z} \right) = \rho F_y - \frac{\partial \hat{p}}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 \hat{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \hat{v}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \hat{v}}{\partial z^2} \right) - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \overline{v'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} \right) \quad (2-6)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \hat{w}}{\partial t} + \frac{\partial \hat{w}\hat{u}}{\partial x} + \frac{\partial \hat{w}\hat{v}}{\partial y} + \frac{\partial \hat{w}\hat{w}}{\partial z} \right) = \rho F_z - \frac{\partial \hat{p}}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 \hat{w}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \hat{w}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \hat{w}}{\partial z^2} \right) - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \overline{w'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{w'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w'w'}}{\partial z} \right) \quad (2-7)$$

em que

\hat{u} , \hat{v} e \hat{w} são médias temporais das componentes de velocidade (m/s);

\hat{p} , é a média temporal de pressão (Pa);

u' , v' e w' são flutuações das componentes de velocidade (m/s).

Conforme Deltares (2020), o módulo Delft3D-FLOW resolve as equações de águas pouco profundas ou águas rasas, obtidas por integração segundo a direção vertical das equações de Navier-Stokes para fluidos incompressíveis, assumindo águas pouco profundas e a hipótese de Boussinesq. As acelerações verticais são desprezadas, enquanto em modelos 3D as velocidades verticais são calculadas a partir da equação de continuidade.

As equações que representam o princípio da conservação do momento linear horizontal apresentam a seguinte forma (Alves, 2020):

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV = -\frac{Px}{\rho} + \left(\frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho(h + \eta)} \right) + Fu \quad (2-8)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + fU = -\frac{Py}{\rho} + \left(\frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho(h + \eta)} \right) + Fv \quad (2-9)$$

em que

U e V são as componentes da velocidade na direção x e y respetivamente;

ρ é a densidade;

η é o nível do mar e h a profundidade local;

τ_{sx} e τ_{sy} são as tensões de cisalhamento do vento;

τ_{bx} e τ_{by} as tensões junto ao fundo;

$\frac{\partial U}{\partial t}$ e $\frac{\partial V}{\partial t}$ são os termos de acelerações local;

$U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y}$ e $U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y}$ são as acelerações advectivas;

fV e fU a aceleração de Coriolis;

$\frac{Px}{\rho}$ e $\frac{Py}{\rho}$ representam a força do gradiente de pressão por unidade de massa;

$(\tau_{sx} - \tau_{bx})$ e $(\tau_{sy} - \tau_{by})$ são as diferenças entre as tensões de superfície e fundo;

Fu e Fv são as tensões horizontais viscosas.

2.1.2. Morfodinâmica

Segundo Karathanasi e Belibassakis (2019), entender os processos de erosão e deposição nas zonas costeiras e prever a evolução da costa é essencial para o planeamento de ações nessas áreas para proteção do ambiente costeiro e

desenvolvimento sustentável. Apesar disso, Taborda e Ribeiro (2015) afirmam que conseguir prever a evolução das praias de areias num cenário de alterações climáticas é um dos maiores desafios para os geomorfologistas.

Um dos métodos para quantificar o transporte sedimentar em trechos fluviais é através do balanço de massa sedimentar (Griffiths e Topping, 2017), calculado pela equação (2-10).

$$\Delta S = I + I_{GT} + I_{VT} - E \quad (2-10)$$

em que

ΔS é a variação de sedimentos acumulados em um determinado trecho;

I é a entrada de sedimentos transportados pelo rio no trecho;

I_{GT} é a contribuição dos afluentes (medidos) ao longo do trecho;

I_{VT} é a contribuição de afluentes (não medidos) ao longo do trecho;

E é a massa de sedimentos transportados a jusante do trecho.

Essa equação corresponde a um balanço de massa em que não há reações ocorrendo, sendo assim o acúmulo igual a entrada menos a saída de sedimentos no sistema estudado.

Um exemplo de aplicação desse balanço de modo mais detalhado pode ser observado no trabalho de Frings et al. (2019), expresso na equação (2-11), em que foi aplicada no estudo da morfodinâmica do rio Reno.

$$\Delta S = (I_{up} + I_{tr} + I_{se} + I_{di} + I_{ar} + I_{ab} + I_{do}) - (O_{do} + O_{se} + O_{dr} + O_{gr} + O_{fl} + O_{po} + O_{ab}) \quad (2-11)$$

Em que:

I_{up} é a entrada de sedimentos transportados pelo rio de montante;

I_{tr} é a contribuição dos afluentes;

I_{se} é a contribuição de canais secundários;

I_{di} é a contribuição devido às fontes difusas (como erosão das margens);

I_{ar} é a contribuição artificial;

I_{do} é a contribuição da área a jusante;

O_{do} é a saída de sedimentos para jusante;

O_{se} é a saída por canais secundários;

O_{dr} é a saída por dragagem;

O_{gr} é a saída devido a retenção em quebra-mares;

O_{fl} é a saída para as várzeas;

O_{po} é a saída devido a portos;

O_{ab} é a perda de massa devida à abrasão.

Observa-se, nesse caso, que há um termo de contribuição de sedimentos da área a jusante, sendo importante em áreas estuarinas uma vez que pode haver transporte de jusante para montante.

No software a aplicar, o Delft3D-FLOW calcula do transporte de sedimentos resolvendo a equação (2-12), que é uma equação tridimensional de balanço de massa para sedimentos (Deltares, 2020).

$$\begin{aligned} \frac{\partial c^{(l)}}{\partial t} + \frac{\partial u \cdot c^{(l)}}{\partial x} + \frac{\partial v \cdot c^{(l)}}{\partial y} + \frac{\partial (w - w_s^{(l)}) \cdot c^{(l)}}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_{s,x}^{(l)} \cdot \frac{\partial c^{(l)}}{\partial x} \right) \\ - \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_{s,y}^{(l)} \cdot \frac{\partial c^{(l)}}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_{s,z}^{(l)} \cdot \frac{\partial c^{(l)}}{\partial z} \right) = 0 \end{aligned} \quad (2-12)$$

em que:

$c^{(l)}$ é a concentração mássica da fração do sedimento (l) (kg/m^3);

u , v e w são as componentes da velocidade do fluxo (m/s);

$\varepsilon_{s,x}^{(l)}$, $\varepsilon_{s,y}^{(l)}$ e $\varepsilon_{s,z}^{(l)}$ são os coeficientes de difusividade turbulenta da fração do sedimento (l) (m^2/s);

$w_s^{(l)}$ é a velocidade de sedimentação da fração do sedimento (l) (m/s).

2.1.3. Salinidade

Pinho (2000) define como salinidade a quantidade total de sais dissolvidos na água do mar o que constitui a maior parte da matéria dissolvida na água do mar. Miranda et al. (2002) afirmam que os gradientes longitudinais de salinidade são fundamentais para a dinâmica do estuário e seus processos de mistura e transporte.

O gradiente de salinidade também é de extrema importância para os seres-vivos existentes neste ecossistema (Melo, 2020). O trabalho de Lau e Jacobs (2017) demonstra a importância da salinidade para os processos biológicos dentro do estuário, sendo estudado a influência do aumento de salinidade em duas espécies de peixes no delta do Rio Colorado. Gallego-Tévar et al. (2019) também evidenciam a influência da salinidade em espécies nativas e invasivas de plantas na Baía do São Francisco, que recebe água dos rios Sacramento e San Joaquin.

Chen et al.(2016) aplicaram um modelo 3D para avaliar a influência do aumento do nível do mar na intrusão salina no estuário do rio Yangtze, na China, simulando o nível atual do mar assim como aumentos de 0.5, 1 e 2 m, concluindo que a intrusão salina é deslocada a montante com o aumento do nível médio do mar sendo que no cenário de aumento do nível médio do mar de 2 m água de quatro reservatórios chega a níveis de salinidade não potáveis na estação seca.

Esses trabalhos demonstram a importância de se avaliar a intrusão salina nos estuários, refletindo em impactos ecológicos assim como para a população do entorno.

2.2. Alterações climáticas

Substâncias e processos, naturais e antropogênicos, que alteram o balanço energético da Terra, são causas das alterações climáticas (IPCC, 2014). Há um desequilíbrio nesse balanço energético, com mais energia, do sol, entrando do que saindo da atmosfera desde pelo menos 1970, causando aquecimento do sistema, sendo que mais de 90% da energia em excesso é armazenada nos oceanos (IPCC, 2013).

Concentrações elevadas de gases de efeito estufa na atmosfera é um fator que aumenta o aquecimento do planeta, tendo-se observado um aumento significativo desses gases desde 1750 (40% de aumento para CO₂, 150% de aumento para CH₄ e 20% de aumento de N₂O), atingindo concentrações sem precedentes nos últimos 800.000 anos (IPCC, 2014).

Com o aquecimento do sistema climático, há aumento do nível médio do mar, sendo que, segundo o quinto relatório de avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, IPCC (2014), é causado principalmente pela expansão volumétrica

da água decorrente do seu aquecimento, assim como a transferência de volume de água anteriormente armazenado em terra para os oceanos.

Esse aumento do nível médio dos oceanos já é observado ao longo do século XX e XXI, sendo que, de 1901 a 1990, o aumento observado foi, em média, de 1.38 mm por ano, enquanto de 1993 até 2015 o ritmo médio foi de 3.16 mm por ano.

A quantificação do aumento futuro é feita por modelação, que depende do cenário de emissões utilizado (IPCC, 2019). Os cenários definidos no quinto relatório do IPCC (2014), denominados de *Representative Concentrations Pathways* (RCP), representam diferentes possibilidades de emissões de gases do efeito estufa ao longo do século XXI. Há um cenário que representa medidas de controle mais restritivas (RCP2.6), dois cenários intermédios (RCP4.5 e RCP6.0) e o último que reflete um cenário de emissões mais gravoso (RCP8.5). A Tabela 1 mostra os aumentos esperados para cada cenário.

Nota-se que, apesar de dados do sexto relatório já estar publicado na data de conclusão desse trabalho, optou-se por apresentar os dados do quinto relatório de modo a manter a coerência entre todos os dados e referências utilizados na modelagem.

Tabela 1. Aumento do nível do mar para diferentes cenários (adaptado de IPCC, 2014).

Cenário	Aumento do nível médio do mar (m) ^a			
	2046-2065		2081-2100	
	Média	Variação Provável	Média	Variação Provável
RCP2.6	0.24	0.17 a 0.32	0.40	0.26 a 0.55
RCP4.5	0.26	0.19 a 0.33	0.47	0.32 a 0.63
RCP6.0	0.25	0.18 a 0.32	0.48	0.33 a 0.63
RCP8.5	0.30	0.22 a 0.38	0.63	0.45 a 0.82

^a em relação ao nível do período de 1986 a 2005.

O relatório do IPCC (2013) afirma que mudanças nos níveis regionais do mar podem ser substancialmente diferentes da média global. Nesse sentido, Vousdoukas et al. (2017) estimaram que os níveis médios do mar na costa europeia podem subir de 21 cm (RCP4.5) a 24 cm (RCP8.5) até 2050 e de 53 cm a 77 cm até 2100.

Em relação à precipitação, Pereira et al. (2020) estudaram os eventos extremos na Península Ibérica sob os efeitos das alterações climáticas, utilizando o cenário RCP8.5. De modo geral, os resultados demonstraram entre 20% e 40% de diminuição da precipitação, principalmente no verão podendo chegar a 80% de redução, com aumento de eventos de seca.

Essas conclusões estão na mesma direção do estudo de Soares et al. (2017), realizado para Portugal, considerando os cenários RCP4.5 e RCP8.5. Os resultados dos dois cenários demonstraram um comportamento semelhante, sendo as mudanças mais brandas quando considerado o RCP4.5. De modo geral, projetaram um aumento dos eventos e do período de seca, acompanhado também de um aumento de eventos ocasionais de precipitação muito intensa.

Robins et al. (2016) discutem em seu trabalho o resultado das alterações climáticas em estuários do Reino Unido, avaliando tendências passadas e projeções, indicando diversos impactos que podem decorrer dessas mudanças e o nível de incerteza relacionado aos mesmos.

2.3. Modelação numérica

Modelos numéricos são essenciais no estudo de áreas costeiras e de estuários, proporcionam um entendimento profundo dos processos hidrodinâmicos, sendo ferramentas importantes na avaliação e projeção dos efeitos de ações antropogénicas, eventos extremos ou alterações climáticas (Iglesias et al., 2019b).

Vousdoukas et al. (2016) utilizaram o programa Delft3D para projetar níveis extremos causados por tempestades em cenários de alterações climáticas. O modelo foi validado com resultados satisfatórios.

O trabalho de Des et al. (2019) utilizou o mesmo *software* para estudar a duração e a intensidade de intrusões de água doce, do rio Minho e na Ria de Vigo. A utilização da modelação permitiu avaliar diferentes fases do processo de intrusão, assim como a influência de diversos fatores como o vento e o caudal fluvial.

Iglesias et al. (2019b) estudaram o estuário do rio Douro, utilizando dois modelos 2DH (duas dimensões horizontais), com os programas Delft3D e Telemac2D, validados satisfatoriamente. A utilização dos modelos permitiu a avaliação de cenários e a

conclusão de que, com a presente configuração do estuário, caudais iguais aos encontrados historicamente resultariam em inundações nas margens do estuário a jusante da Ponte da Arrábida mais significativas que as anteriores, sendo o agravamento para montante daquela ponte pouco significativo, atendendo a que o caudal fluvial é determinante para os níveis de inundação a montante da referida ponte.

Para que um modelo numérico seja confiável, o mesmo deve ser calibrado, através da comparação entre os resultados do modelo com dados observados. Afigura-se muito interessante utilizar assimiladores de dados, otimizando o tempo e a busca por um resultado ótimo para os valores dos parâmetros de calibração dos modelos (Melo, 2020).

O trabalho de Garcia et al. (2015) utilizou tanto o Delft3D quanto o OpenDA para o caso da Baía de San Quintin. Concluiu que o Delft3D foi capaz de reproduzir os processos na baía, enquanto a calibração com o OpenDA melhorou a implementação do modelo, obtendo resultados melhores após a calibração automática com o OpenDA.

Yang et al. (2015) aplicaram modelação para estudar o impacto do aumento do nível do mar e dos caudais fluviais no estuário do Rio Snohomish, nos Estados Unidos da América. Em relação à intrusão salina, concluíram que as alterações climáticas terão maior influência quando comparadas às alterações no uso do solo. Apontam também para a não linearidade da variação da intrusão salina com alterações nos caudais fluviais.

Melo et al. (2020) também utilizaram ambos programas, o Delft3D para a modelação e o OpenDA para realizar a calibração automática do modelo. Segundo os autores, o assimilador reduziu o esforço necessário, fazendo o modelo convergir rapidamente para uma solução com erros aceitáveis, sendo ainda recomendado a utilização dessa ferramenta para calibração de outros parâmetros.

3. Metodologia

A metodologia desenvolvida nesse trabalho é muito semelhante à descrita no trabalho de Melo (2020). O modelo criado no trabalho citado foi utilizado neste estudo mais aprofundado da intrusão salina em diferentes cenários de caudal fluvial e nível do mar.

3.1. Área de estudo

A área estudada, o estuário do rio Minho, foi processada para criação do modelo com o auxílio de um sistema de informações geográfica (SIG), estipulando a cota de 4 m (em relação ao nível médio do mar, NMM) como os limites interiores do modelo. A extensão modelada, por sua vez, é de aproximadamente 38 km desde a foz até à fronteira de montante, determinado pela presença de uma estação de monitorização da Agência Portuguesa do Ambiente (APA). A Figura 1 apresenta a área modelada.

O trabalho de Melo (2020) apresenta o rio Minho com extensão de 340 km e caudal médio anual do rio Minho é de $300 \text{ m}^3/\text{s}$, variando de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ no verão a $800 \text{ m}^3/\text{s}$ no inverno.

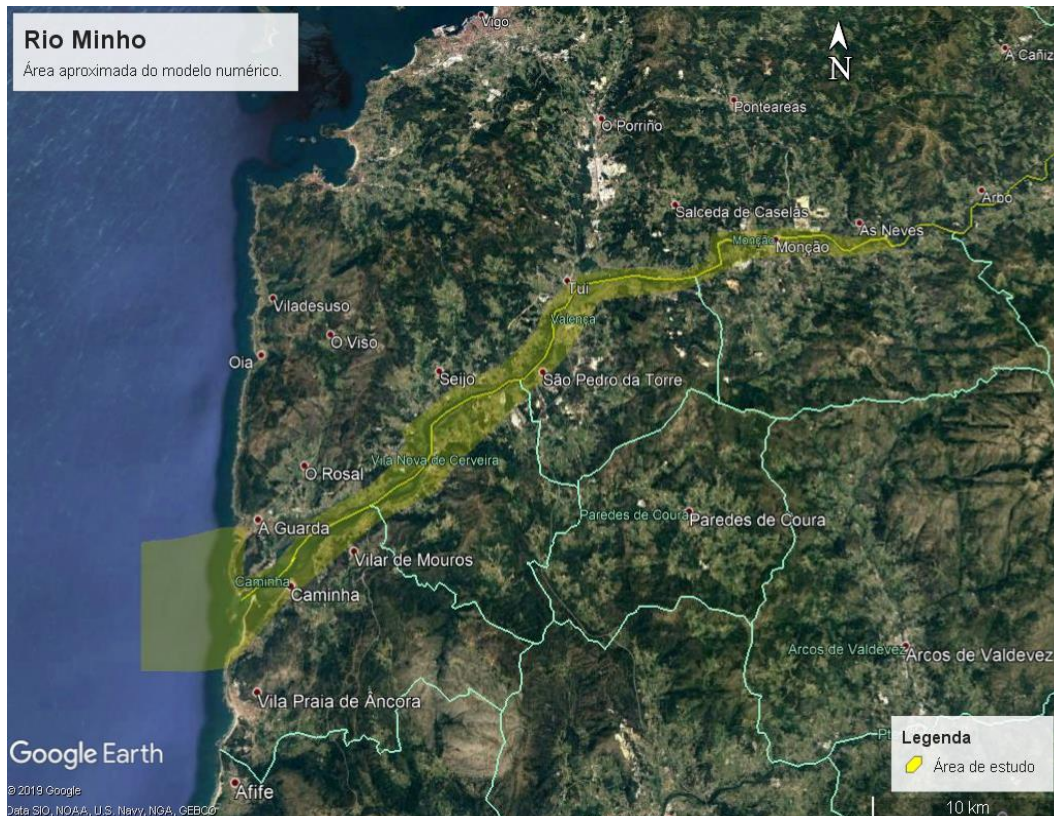


Figura 1. Extensão do modelo numérico (Melo, 2020).

3.2. Modelo

A criação do modelo é descrita com detalhes no trabalho de Melo (2020), sendo apresentadas seguidamente as suas principais características. Foi utilizado o *software* Delft3D para a criação do modelo. Foram inicialmente criadas duas grelhas, uma para a região oceânica e outra para a estuarina, que foram posteriormente unidas, resultando na grelha final apresentada na Figura 2.

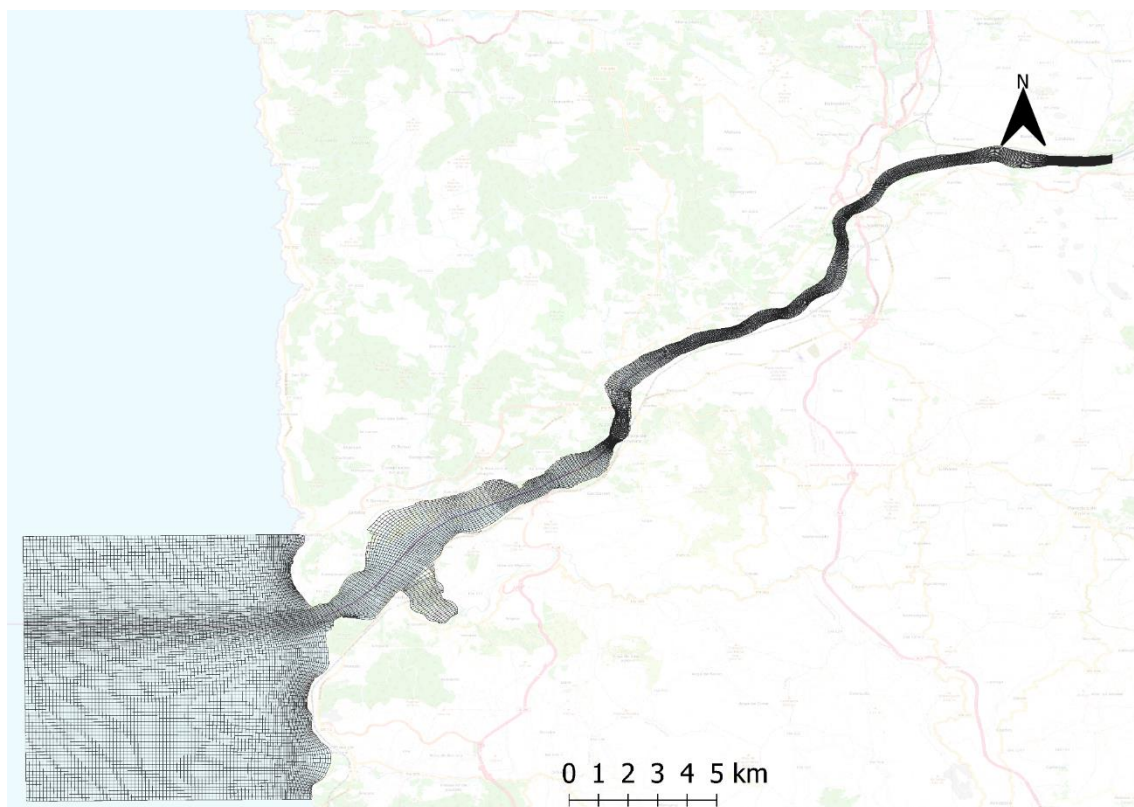


Figura 2. Grelha utilizada no modelo.

Com os limites estipulados, a batimetria foi definida a partir dos dados topobatimétricos obtidos com tecnologia LIDAR (*Light Detection and Ranging*), com resolução espacial de um metro, enquanto as condições de fronteira foram obtidas com base nas informações da estação de observação 01G/03H, localizada em Foz do Mouro, para quantificação dos caudais fluviais. No caso das marés, foram utilizados os constituintes harmônicos da região, obtidos inicialmente a partir do *software* Delft Dashboard, sendo escolhido o modelo *TPXO 7.2 Global Inverse Tide Model*. A Figura 3 apresenta os resultados da batimetria que foi utilizada no modelo.

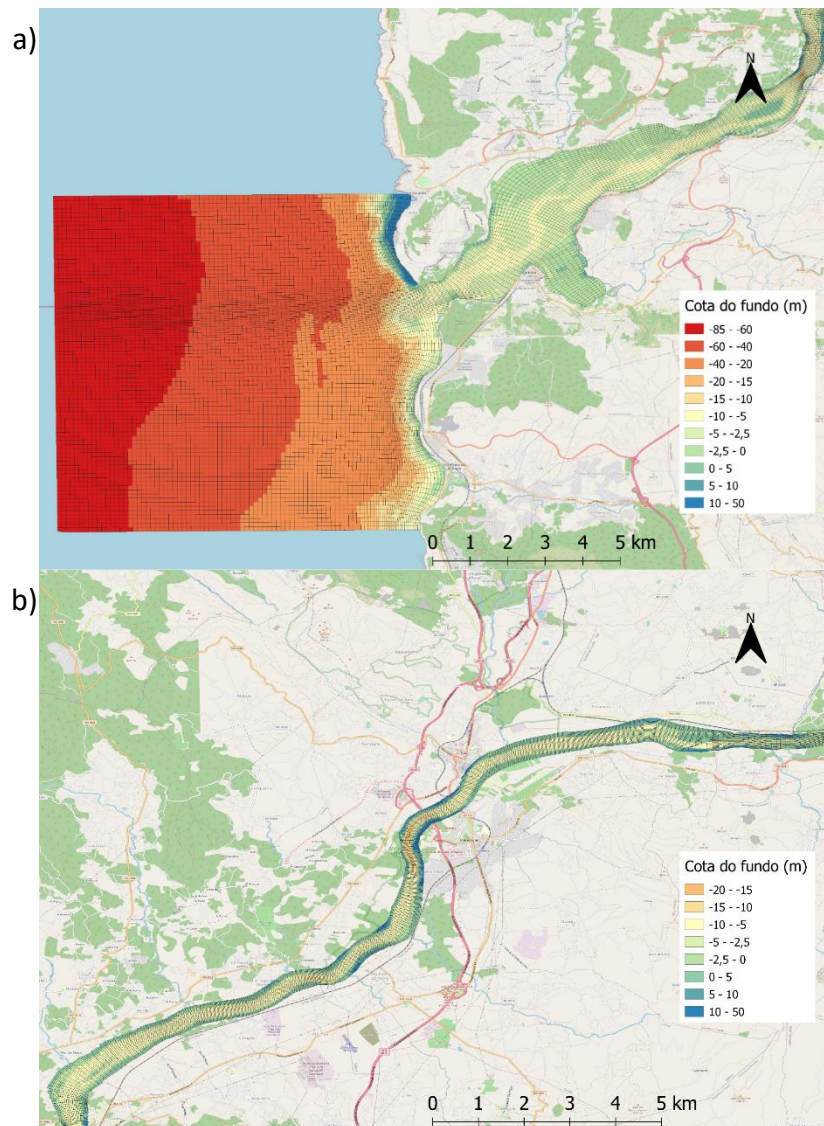


Figura 3. Batimetria do estuário. a) Jusante b) Montante

Optou-se pela utilização de um modelo 2DH, de duas dimensões horizontais, uma vez que o estuário estudado não apresenta profundidade suficiente que justifique a adoção de um modelo 3D. No trabalho de Melo (2020), essa opção é corroborada, uma vez que há a adoção de um modelo 3D, porém os resultados não demonstram estratificação vertical significativa. Numa simulação com seis camadas verticais, o autor obteve os resultados apresentados na Figura 4.

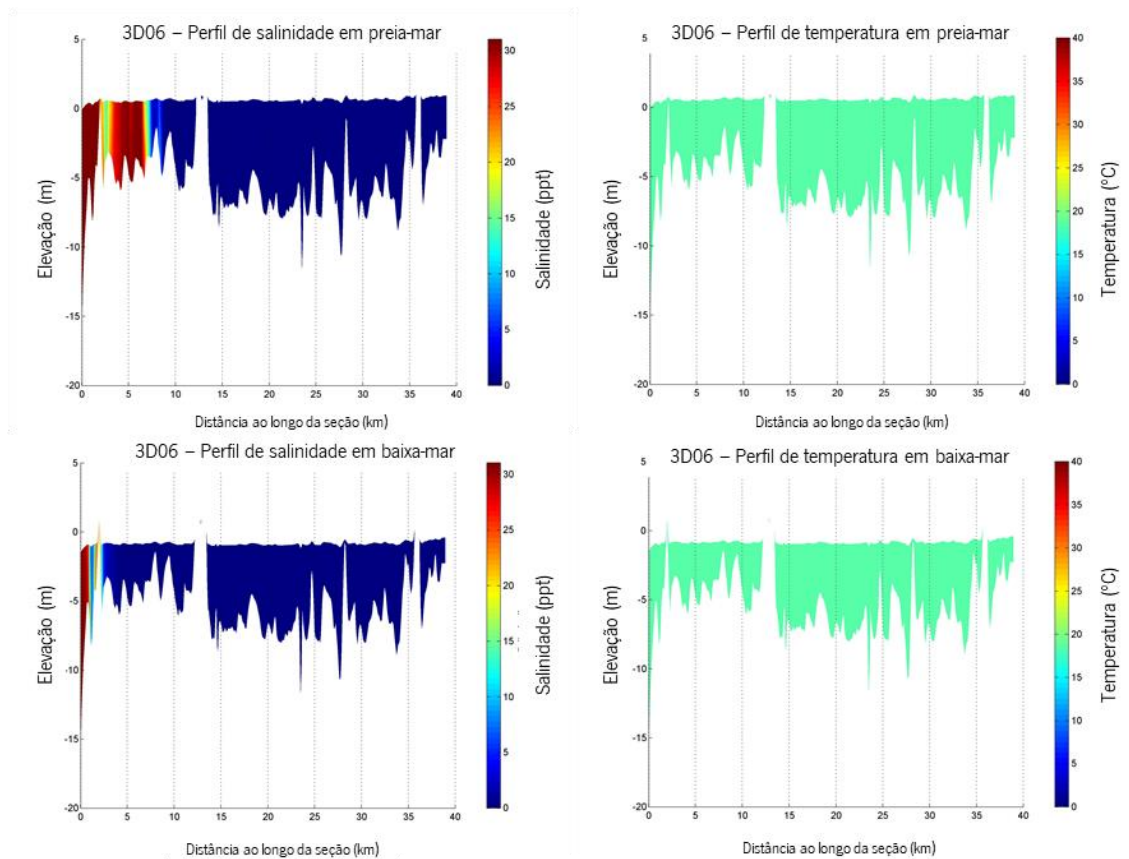


Figura 4. Perfis longitudinais em cenário com caudal de $325.82 \text{ m}^3/\text{s}$ e sem sobrelevação do nível do mar (Melo, 2020).

O modelo foi calibrado utilizando-se dados de campanhas de medição de duas estações, em Tui e Goian, nos anos de 2006 e 2019. Utilizando-se o *software* OpenDA, os parâmetros calibrados incluem o coeficiente de Manning, as constituintes da maré M2, S2, N2 e K2, assim como uma correção da batimetria, variando-os de forma individual e simultânea (Melo et al., 2020). Posteriormente, o modelo foi recalibrado para outras campanhas de campo, obtendo-se os valores apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Principais valores dos parâmetros de calibração utilizados no modelo.

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
M2 amplitude (m)	1.397	K2 amplitude (m)	1.229
M2 ângulo de fase (graus)	22.016	K2 ângulo de fase (graus)	102.482
S2 amplitude (m)	0.864	Coefficiente de viscosidade turbulenta (m ² /s)	1
S2 ângulo de fase (graus)	112.86	Coefficiente de difusão turbulenta (m ² /s)	10
N2 amplitude (m)	0.51	Coefficiente de Manning	0.074
N2 ângulo de fase (graus)	55.391	Temperatura (°C)	15

De forma a facilitar a reprodução dos resultados desse trabalho, são apresentadas configurações adicionais no Apêndice A.

3.3. Pontos de observação

Para facilitar a comparação de resultados e manter a coerência entre os diferentes trabalhos, assim como na adoção do modelo, os pontos de observação que serão utilizados são os mesmos adotados por Melo (2020). A localização dos pontos pode ser observada na Figura 5.



Figura 5. Localização dos pontos de observação (Melo, 2020).

3.4. Definição de cenários

Com o intuito de estudar a intrusão salina no estuário, sob efeito das alterações climáticas, foi necessário definir uma simulação da situação atual, de modo a melhor entender o efeito das alterações, com os valores de caudal médio anual, da estação seca e da estação húmida, tal como adotado nas simulações do trabalho de Melo (2020).

Com a base de comparação, foram simulados diversos cenários considerando-se o aumento do nível do mar correspondentes aos cenários de emissões RCP4.5 e RCP8.5 para os anos de 2050 e 2100. Como o objetivo principal é observar os efeitos na intrusão salina nesses casos foram utilizados um valor de caudal de $10 \text{ m}^3/\text{s}$, de modo a representar a situação de seca extrema (ou de retenção da água nas albufeiras sem descargas significativas), foi considerado um valor alinhado com as observações na estação da Foz do Mouro, onde nos períodos de 2003 a 2008 e de 2019, usando uma média móvel de 3 dias, o valor mínimo observado foi de $11,14 \text{ m}^3/\text{s}$.

Estes cenários de aumento do nível do mar também foram simulados com o caudal anual máximo associado a um período de retorno de 100 anos utilizado por Melo (2020), de modo a observar o comportamento durante uma cheia e a intrusão de água doce no mar.

Por fim, utilizando o cenário menos otimista, RCP8.5 em 2100, variou-se o caudal em torno do mínimo, de modo a tentar observar o quanto as variações de caudal nessa faixa impactam a intrusão salina.

É importante realçar a presença de diversas barragens na bacia hidrográfica do rio Minho, na parte espanhola, sendo o caudal que chega ao estuário regulado sobretudo pela barragem de Frieira, localizada 80 km a montante da foz (Iglesias et al., 2019a). Assim, o caudal que chega ao estuário é influenciado apenas indiretamente pelas alterações dos padrões de pluviometria, sendo mais dependente da gestão dos volumes armazenados nas albufeiras, que poderão sofrer pressões e revisões decorrentes das alterações climáticas.

Por isso, optou-se por utilizar uma variação de caudais ao invés de recorrer aos resultados de estudos climáticos regionais para estimar a vazão provável do rio. Além disso, tal opção foi feita também para aumentar a validade do presente estudo, não estando esse dependente dos resultados, que certamente serão ainda refinados e alterados ao longo do tempo e da mudança nas emissões que se vier a verificar.

Todos os cenários foram simulados com a influência da maré, de forma a manter a mistura entre água salina e doce. Além disso, para atingir um estado de equilíbrio, foram simulados dois meses sob condições atuais de nível do mar e caudal médio, partindo de uma situação em estiagem (nível de água inicial de 0 m - NMM) e salinidade inicial uniforme igual a 18 ppt. A partir desse resultado, foi criado um ficheiro de reinicialização que serviu de condição inicial para as demais simulações, que também tiveram duração de dois meses sob as respetivas condições descritas na Tabela 3.

Tabela 3. Cenários simulados para estudo.

Cenário	Caudal (m ³ /s)	Aumento do nível médio do mar (m)	Objetivo
C1	300	0	Situação atual média
C2	100	0	Situação atual no verão
C2b	10	0	Situação de seca extrema
C3	800	0	Situação atual no inverno
C4a	10	0.21	Maior intrusão salina para o cenário RCP4.5 em 2050
C4b	10	0.53	Maior intrusão salina para o cenário RCP4.5 em 2100
C5a	10	0.24	Maior intrusão salina para o cenário RCP8.5 em 2050
C5b	10	0.77	Maior intrusão salina para o cenário RCP8.5 em 2100
C6a	6037.7	0.21	Intrusão de água doce no mar no cenário RCP4.5 em 2050
C6b	6037.7	0.53	Intrusão de água doce no mar no cenário RCP4.5 em 2100
C7a	6037.7	0.24	Intrusão de água doce no mar no cenário RCP8.5 em 2050
C7b	6037.7	0.77	Intrusão de água doce no mar no cenário RCP8.5 em 2100
C8-x	Caudal Variável (x)	0.77	Entender o comportamento da intrusão salina para o pior cenário de alterações (RCP8.5 em 2100)

3.5. Referencial para comparação dos resultados

Os resultados serão comparados entre si através de concentrações de salinidade adotadas pela Diretiva 2000/60/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 23 de

outubro de 2000 (UE, 2000), também conhecida como Diretiva Quadro da Água (DQA). Atenta-se para o fato de que os limites da DQA são relativos à média anual, enquanto nesse trabalho serão comparadas concentrações instantâneas, sendo apenas adotada a DQA como base de comparação entre os cenários.

Assim, o principal limite que será discutido a seguir é o de 0.5 ppt, sendo que será considerado o limite de concentração para definir a intrusão salina. Os intervalos de salinidade são definidos como:

- água doce, de 0 a 0.5 ppt;
- oligo-halino, de 0.5 a 5 ppt;
- meso-halino, de 5 a 18 ppt;
- poli-halino, de 18 a 30 ppt; e
- eu-halino, de 30 a 40 ppt (UE, 2000).

4. Resultados

Na apresentação dos resultados, primeiramente serão considerados os cenários de forma isolada, apenas sendo feita a correlação e comparação entre os mesmos, posteriormente, de forma mais sintética. Resultados adicionais que não contribuiriam muito para a discussão serão apresentados no Apêndice B.

4.1. Cenários sem elevação do nível médio do mar

O resultado do primeiro cenário, em que foi simulada a condição média atual, pode ser observado na Figura 6 o caso de preia-mar de uma maré viva. Verifica-se nesse caso, que a intrusão salina se estende até uma secção próxima de Lanhelas, a cerca de 8.2 km de distância da foz.

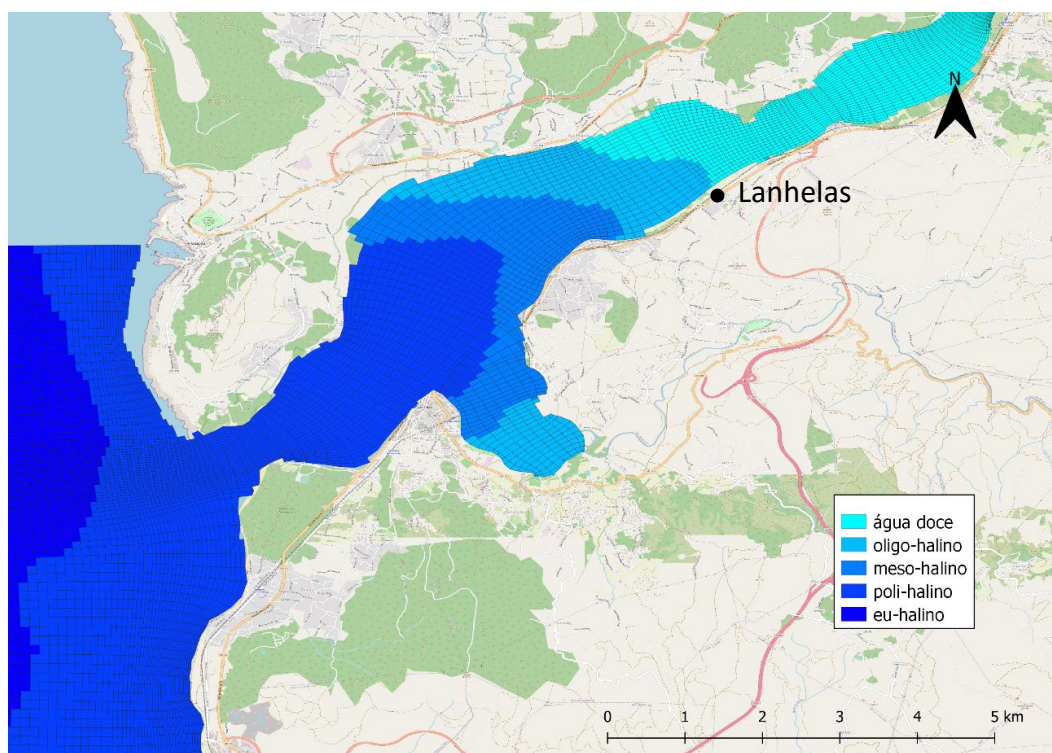


Figura 6. Intrusão salina no cenário C1, caudal médio anual e aumento da elevação do nível médio de mar nulo.

Já no segundo cenário, simula-se a situação do caudal médio de verão, estação seca, sendo assim esperado uma intrusão salina maior em direção ao interior do estuário. Observa-se, na Figura 7, que a intrusão nesse caso de fato foi ligeiramente maior, chegando a uma secção localizada a uma distância de 11.4 km da foz.

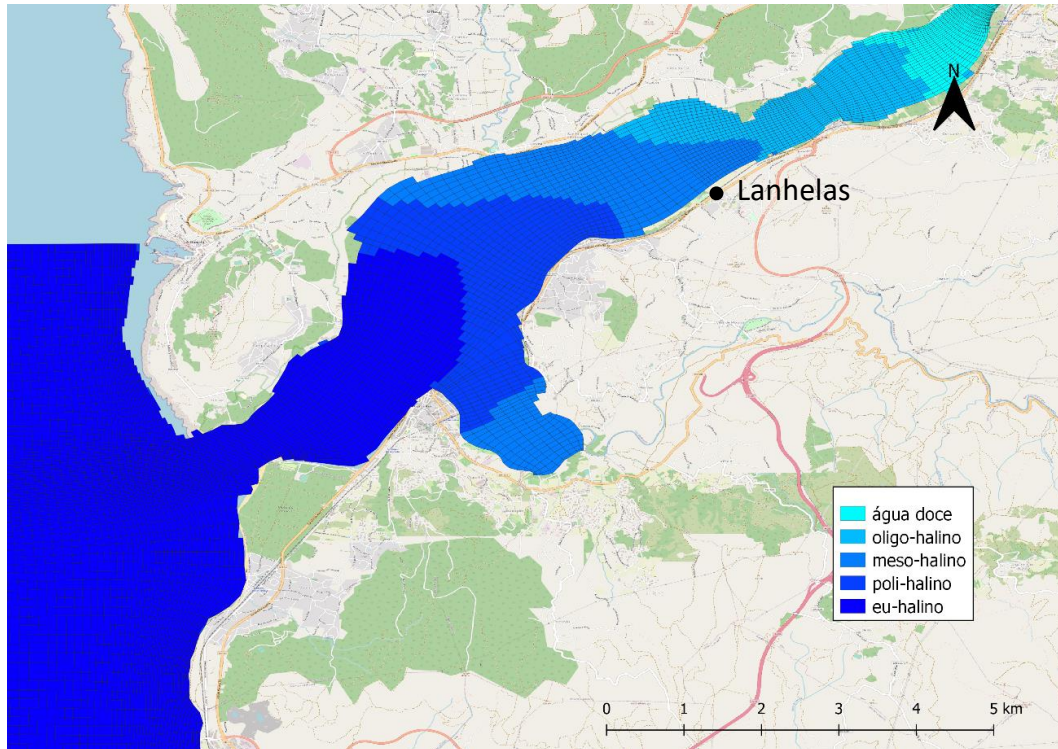


Figura 7. Intrusão salina no cenário C2, caudal médio da estação seca e aumento da elevação do nível médio de mar nulo.

Numa situação de seca mais severa, simulada no cenário C2b, vemos a intrusão salina ocorrer numa faixa mais extensa para montante do estuário, seus efeitos chegando então a uma distância da foz de 26.7 km. A Figura 8 mostra o resultado desse cenário, em que a interface entre água doce e oligo-halina ocorre já próximo da cidade de Valença.

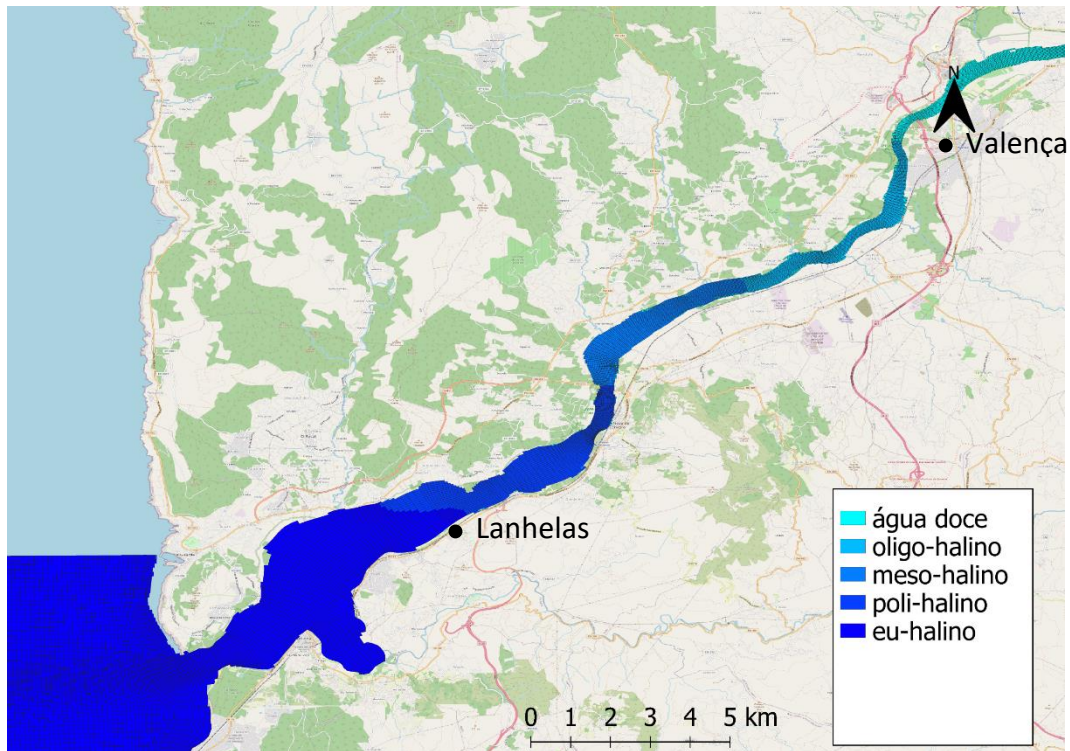


Figura 8. Intrusão salina no cenário C2b, caudal de seca extrema sem aumento da elevação do nível médio do mar.

No terceiro cenário, considerando-se um caudal superior ao médio, tem como interesse além do efeito desse caudal na diminuição da intrusão em praia-mar, também a intrusão da água doce no mar em situação de baixa-mar. Assim, a Figura 9 apresenta ambas situações onde podemos observar que o efeito na intrusão salina é significativo, sendo que na primeira situação a intrusão salina atingiu aproximados 6.1 km de distância da foz, enquanto na segunda situação 1.4 km.

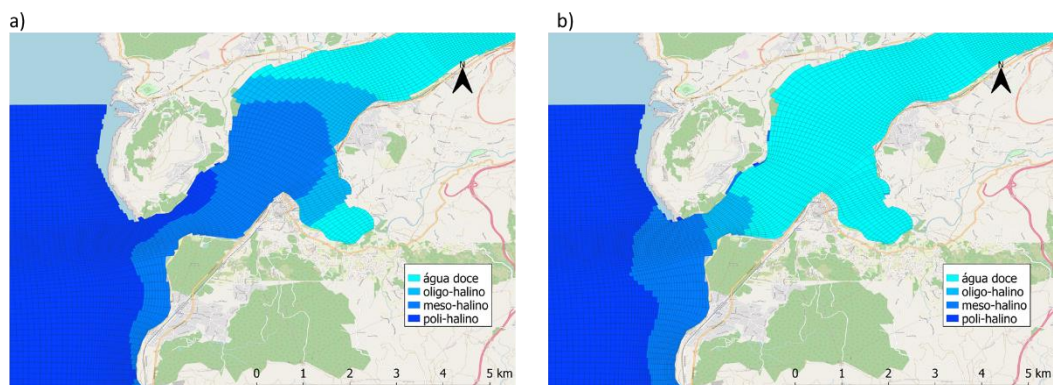


Figura 9. Intrusão salina no cenário C3, caudal médio da estação chuvosa e aumento da elevação do nível médio do mar nulo. a) Preia-mar b) Baixa-mar

4.2. Cenários com elevação do nível do mar e caudal reduzido

Nestes cenários, o principal efeito a ser estudado é o efeito do aumento do nível médio do mar na intrusão salina. Assim, em cada caso, foram selecionadas situações de preia-mar da maré viva.

No cenário C4, simulou-se o aumento do nível do mar correspondente ao RCP4.5 para o ano 2050 (a) e 2100 (b) com aumento respectivo do nível médio do mar de 0.21 m e 0.53 m. Vemos na Figura 10 a intrusão salina a estender-se até à cidade de Valença. Nesses casos, a extensão em relação a foz é de, respetivamente, 27.7 km e 28.4 km. A Figura 11 mostra os mesmos cenários de forma amplificada.

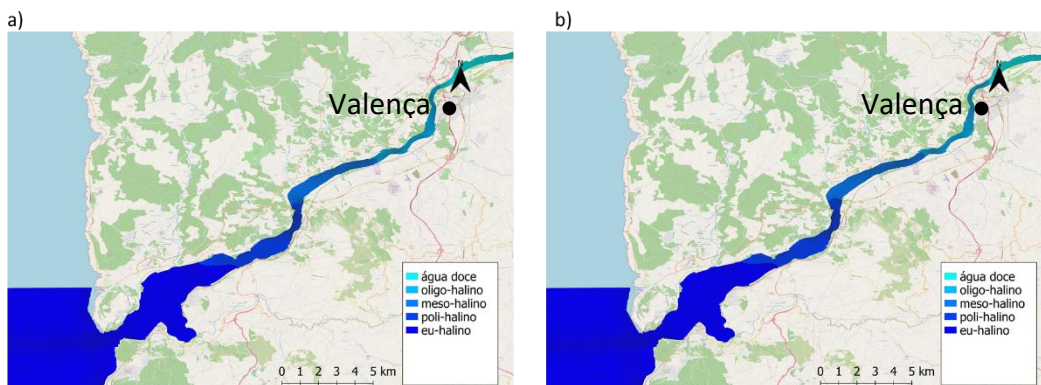


Figura 10. Cenário 4, aumento do nível médio relativo ao RCP4.5 em 2050 (a) e 2100 (b).

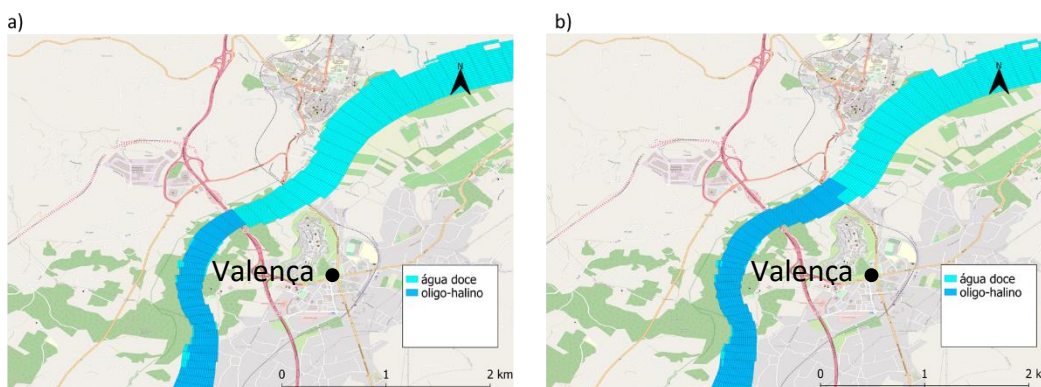


Figura 11. Resultados na área de transição entre água doce e oligo-halina no cenário 4. a) RCP4.5 2050 b) RCP4.5 2100

O cenário 5 segue a mesma lógica, porém utilizando o RCP8.5 para prever o aumento do nível médio do mar, tendo como aumento do nível médio previsto de 0.24 m em 2050 e 0.77 m em 2100. Assim como no caso anterior, a intrusão salina chegou à

cidade de Valença, com extensão em relação à foz de 27.8 km no primeiro caso e 28.9 km no segundo caso. A Figura 12 mostra o resultado desse cenário de forma amplificada.

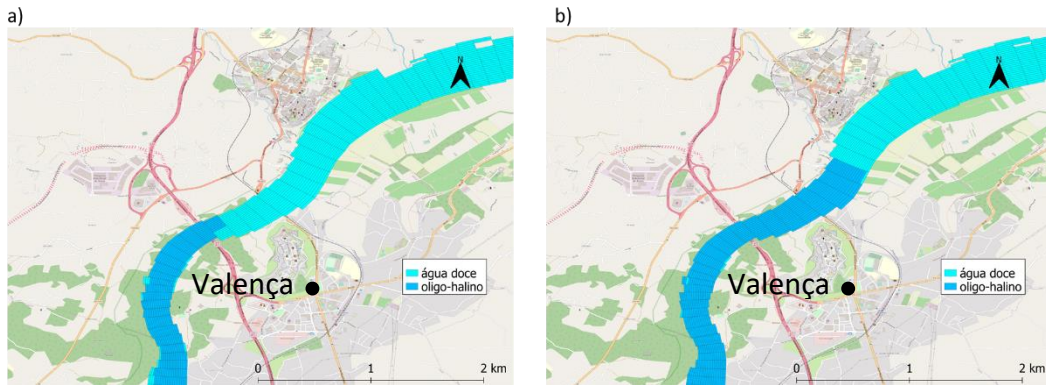


Figura 12. Resultados na área de transição entre água doce e oligo-halina no cenário 5. a) RCP8.5 2050 b) RCP8.5 2100

4.3. Cenários com elevação do nível do mar e caudal de cheia

Nesses cenários o fenômeno que será mais significativo é o da intrusão de água doce no oceano. Assim, apresentam-se os resultados numa situação de baixa-mar de uma maré viva (Figura 13).

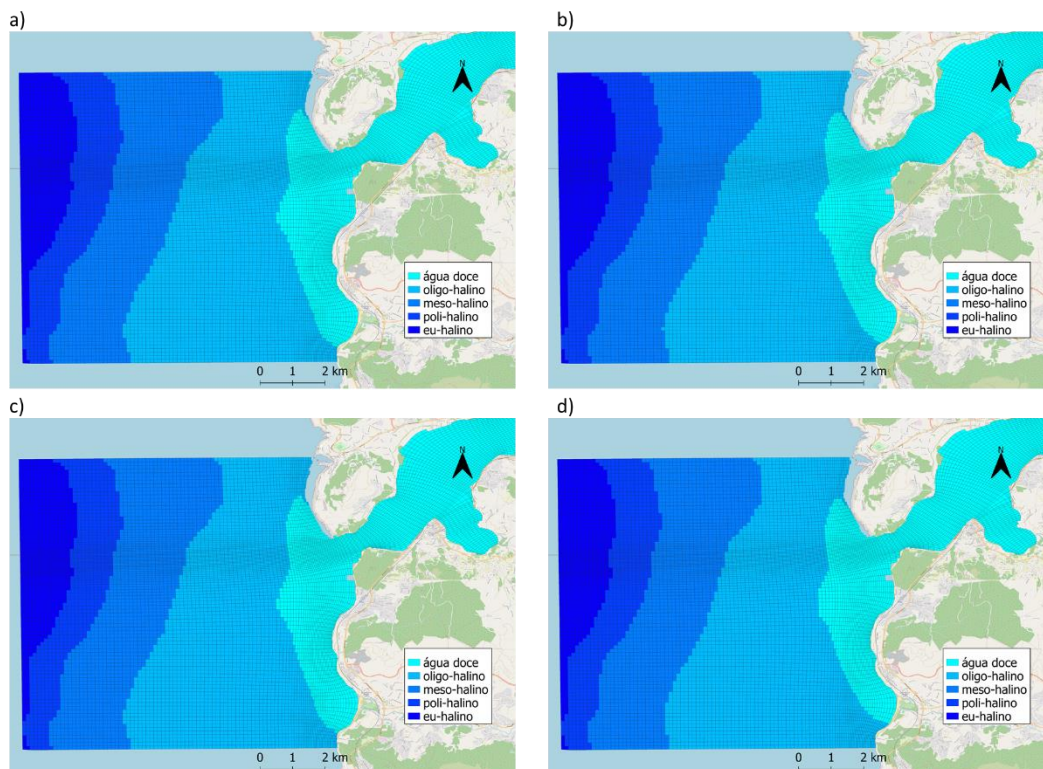


Figura 13. Resultados das simulações dos cenários com caudal de cheia. a) RCP4.5 2050 b) RCP4.5 2100 c) RCP8.5 2050 d) RCP8.5 2100

4.4. Simulações da variação do caudal para o RCP8.5 em 2100

Nas últimas simulações efetuadas, definidas com base no RCP8.5 em 2100, variando o caudal, foram considerados os caudais: 10, 20, 30, 40, 50, 100, 300, 500 e 700 m³/s.

A Figura 14 mostra os resultados da intrusão salina dessas simulações, sendo considerada a distância em relação à foz a que se encontra a interface da água doce com a oligo-halina. De modo a manter o texto, conciso e acessível, preferiu-se a apresentação dos resultados em forma de gráfico, sendo as figuras relativas aos resultados apresentadas no Anexo 2.

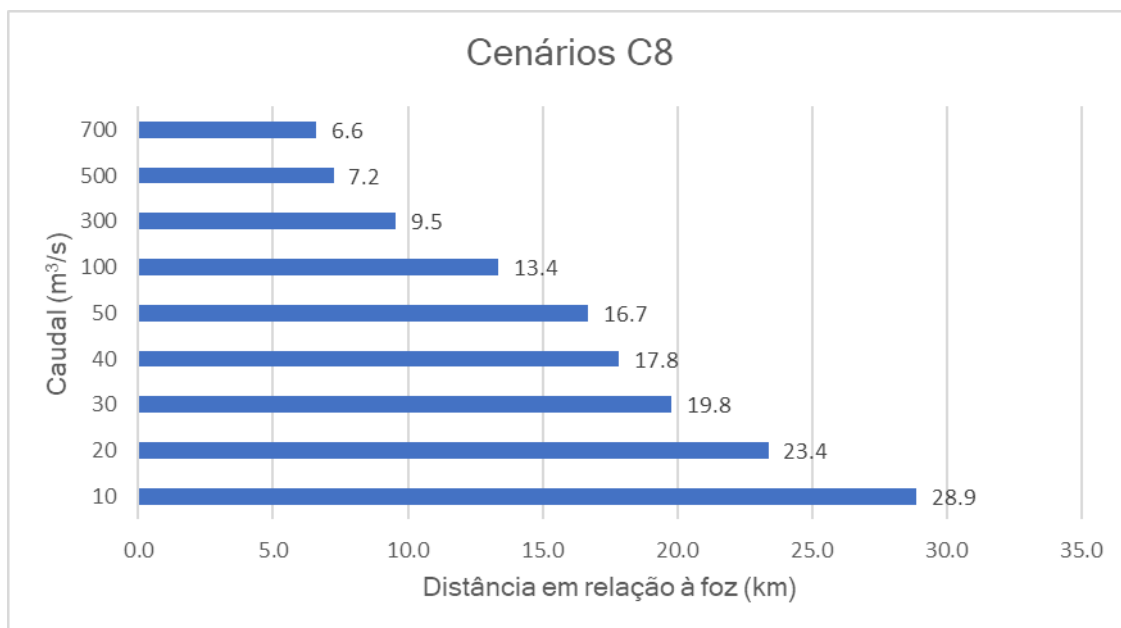


Figura 14. Extensão da intrusão salina em relação à foz das simulações para RCP8.5 2100 para diferentes caudais fluviais.

4.5. Análise e discussão

A Tabela 4 mostra os resultados consolidados de todos os cenários simulados com caudal de estiagem, em situações de preia-mar de uma maré viva.

Comparando os resultados, o cenário C2b tem caudal igual aos cenários 4 e 5, variando apenas o nível médio do mar. Nesses, vemos que a extensão da intrusão salina se mantém em níveis elevados mesmo quando simulado sem o aumento do nível do mar.

Tabela 4. Síntese de resultados das simulações em preia-mar.

Cenário	Caudal (m ³ /s)	Nível do mar (m)	Extensão da intrusão salina (km)
C1	300	0	8.2
C2	100	0	11.4
C2b	10	0	26.7
C3	800	0	6.1
C4a	10	0.21	27.7
C4b	10	0.53	28.4
C5a	10	0.24	27.8
C5b	10	0.77	28.9
(C8-10)			
C8-20	20	0.77	23.4
C8-30	30	0.77	19.8
C8-40	40	0.77	17.8
C8-50	50	0.77	16.7
C8-100	100	0.77	13.4
C8-300	300	0.77	9.5
C8-500	500	0.77	7.2
C8-700	700	0.77	6.6

Ao mesmo tempo, dos cenários com variação do caudal e nível do mar constante, é possível ver que o caudal fluvial tem impacto significativo, apresentando variações de vários quilómetros de intrusão salina mesmo quando a variação do caudal é de 10 m³/s. Esse efeito é reduzido à medida que o caudal aumenta e o efeito passa a ser mais dependente do nível do mar, onde observamos que no cenário C3, com caudal de 800 m³/s a extensão da intrusão salina permanece menor do que no cenário C8-700, com caudal menor, porém o aumento do nível médio do mar correspondente ao que se atingirá em 2100 no cenário RCP8.5.

Ainda assim, em condições extremas de caudal de estiagem no cenário RCP8.5 para 2100, há um aumento na intrusão salina de 2.2 km, podendo trazer prejuízos a

atores públicos e privados, caso não exista planeamento adequado que leve em consideração esse fenómeno.

Além disso, apesar dos estudos das alterações climáticas apontarem para a diminuição da precipitação e aumento dos eventos extremos de seca, deve-se ter em conta o efeito do caudal na intrusão salina numa eventual revisão das regras de operação das barragens no sentido de aumentar o caudal ecológico a ser respeitado. As simulações mostram que o aumento do caudal ecológico pode ser uma boa forma de mitigar casos de intrusão salina excessiva, sendo que a diferença da extensão da intrusão entre o cenário com caudal de 10 m³/s e 20 m³/s foi de 5.5 km, superior aos 2.2 km resultantes do aumento do nível do mar para o pior caso estudado em relação à situação atual.

No que se refere à intrusão de água doce no oceano, não foi possível verificar o efeito completo, uma vez que esse se prolonga para além das fronteiras do modelo utilizado. Para melhor avaliação desse fenómeno, seria necessário a modelação de uma área maior do oceano.

5. Conclusões e sugestões para desenvolvimentos futuros

De forma a responder às questões iniciais a que este trabalho se propôs, foram realizadas diversas simulações considerando o aumento do nível médio do mar sob os cenários RCP4.5 e RCP8.5 adotados pelo IPCC, assim como diversos caudais fluviais determinados com base nos registos históricos ou em variações adotadas de modo a entender o impacto do mesmo no fenómeno da intrusão salina.

A intrusão salina, quantificada como a distância em relação à foz em que se encontra uma salinidade de pelo menos 0.5 ppt, é impactada tanto pelo aumento do nível do mar quanto pela diminuição dos caudais fluviais, dois eventos que são esperados na região em decorrência das alterações climáticas, e que conduzirão ao aumento da extensão da intrusão.

Verificou-se que em cenários menos otimistas, a intrusão salina atinge uma secção distante de 28.9 km da foz do estuário, podendo impactar os usos da água no estuário. Observou-se ainda que a região de montante do estuário é impactada de forma mais severa pela alteração do caudal fluvial do que pelo aumento do nível do mar.

Quando considerados os efeitos tanto do aumento do nível do mar quanto da variação do caudal no estuário, as descargas adotadas na operação das barragens da bacia têm uma importância mais significativa do que o aumento do nível médio do mar. É, assim, um aspecto a considerar na gestão futura da bacia e deverá ser encarado como uma possível ferramenta importante em ações de controlo da intrusão salina, de modo a diminuir impactos económicos e ecológicos.

Nesse sentido, os resultados deste trabalho podem apoiar as decisões futuras sobre a gestão das barragens, de modo a permitir delimitar o caudal mínimo que deve ser respeitado para que a intrusão salina se mantenha abaixo de um nível pretendido, sendo esse nível dependente também de opções políticas e de estudos de outras áreas do conhecimento.

De modo a aprimorar o conhecimento do comportamento do estuário face às alterações climáticas e encontrar respostas mais assertivas para o aumento da sua resiliência, sugere-se a expansão do modelo na área oceânica para avaliar a pluma de água doce ou a diminuição da salinidade no mesmo, que pode ter impactos biológicos

na região. Também deve ser realizado um estudo que avalie o impacto biológico que o aumento da intrusão salina poderá ter no estuário do Rio Minho. Por fim, o levantamento dos usos da água no estuário e as correspondentes limitações em relação à sua salinidade, em conjunto com os resultados obtidos no presente trabalho, permitirá estimar os impactos económicos e uma melhor base de apoio para o planeamento regional de longo prazo.

6. Referências Bibliográficas

- Alves, B. (2020). *Modelagem e Refinamento hidrodinâmico da Baía de Florianópolis* (Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Oceanografia). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil. Disponível em <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/218768>
- Chen, W., Chen, K., Kuang, C., Zhu, D. Z., He, L., Mao, X., Liang, H., & Song, H. (2016). Influence of sea level rise on saline water intrusion in the Yangtze River Estuary, China. *Applied Ocean Research*, 54, 12–25. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2015.11.002>
- Cloern, J. E., Abreu, P. C., Carstensen, J., Chauvaud, L., Elmgren, R., Grall, J., Greening, H., Johansson, J. O. R., Kahru, M., Sherwood, E. T., Xu, J., & Yin, K. (2016). Human activities and climate variability drive fast-paced change across the world's estuarine-coastal ecosystems. *Global Change Biology*, 22(2), 513–529. <https://doi.org/10.1111/gcb.13059>
- Dangendorf, S., Wahl, T., Hein, H., Jensen, J., Mai, S., & Mudersbach, C. (2012). Mean sea level variability and influence of the North Atlantic oscillation on long-term trends in the German Bight. *Water*, 4(1), 170–195. <https://doi.org/10.3390/w4010170>
- Deltares. (2020). *Delft-3D-FLOW: Simulation of Multi-dimensional Hydrodynamic Flows and Transport Phenomena, including Sediments - User Manual*. https://content.oss.deltares.nl/delft3d/manuals/Delft3D-FLOW_User_Manual.pdf
- Des, M., deCastro, M., Sousa, M. C., Dias, J. M., & Gómez-Gesteira, M. (2019). Hydrodynamics of river plume intrusion into an adjacent estuary: The Minho River and Ria de Vigo. *Journal of Marine Systems*, 189(), 87–97. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2018.10.003>
- Elliott, M., & McLusky, D. S. (2002). The need for definitions in understanding estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 55(6), 815–827. <https://doi.org/10.1006/ecss.2002.1031>
- European Commission (2012) *Guidelines on the Implementation of the Birds and Habitats Directives in Estuaries and Coastal Zones*. doi: 10.2779/44024.
- Frings, R. M., Hillebrand, G., Gehres, N., Banhold, K., Schriever, S., & Hoffmann, T. (2019). From source to mouth: Basin-scale morphodynamics of the Rhine River. *Earth-Science Reviews*, 196(April). <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.002>
- Gallego-Tévar, B.; Grewell, B.J.; Futrell, C.J.; Drenovsky, R.E.; Castillo, J.M. (2019). Interactive effects of salinity and inundation on native *Spartina foliosa*, invasive *S.*

- densiflora and their hybrid from San Francisco Estuary, California. *Ann. Bot.* 125(2), 377–389. <https://doi.org/10.1093/aob/mcz170>
- Garcia, M., Ramirez, I., Verlaan, M., & Castillo, J. (2015). Application of a three-dimensional hydrodynamic model for San Quintin Bay, B.C., Mexico. Validation and calibration using OpenDA. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 273, 428–437. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2014.05.003>
- Griffiths, R. E., & Topping, D. J. (2017). Importance of measuring discharge and sediment transport in lesser tributaries when closing sediment budgets. *Geomorphology*, 296, 59–73. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.08.037>
- Horrevoets, A. C., Savenije, H. H. G., Schuurman, J. N., & Graas, S. (2004). The influence of river discharge on tidal damping in alluvial estuaries. *Journal of Hydrology*, 294(4), 213–228. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.02.012>
- Iglesias, I.; Avilez-Valente, P.; Luís Pinho, J.; Bio, A.; Manuel Vieira, J.; Bastos, L.; Veloso-Gomes, F. (2019a). Numerical Modeling Tools Applied to Estuarine and Coastal Hydrodynamics: A User Perspective. In *Coastal and Marine Environments-Physical Processes and Numerical Modelling*; IntechOpen: London, UK. DOI: 10.5772/intechopen.85521
- Iglesias, I., Venâncio, S., Pinho, J. L., Avilez-Valente, P., & Vieira, J. M. P. (2019b). Two Models Solutions for the Douro Estuary: Flood Risk Assessment and Breakwater Effects. *Estuaries and Coasts*, 42(2), 348–364. <https://doi.org/10.1007/s12237-018-0477-5>
- IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- IPCC, 2014: *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- IPCC, 2019: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. In press.
- Karathanasi, F. E., & Belibassakis, K. A. (2019). A cost-effective method for estimating long-term effects of waves on beach erosion with application to Sitia Bay, Crete. *Oceanologia*, 61(2), 276–290. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2018.12.001>

- Lau, C. L. F., & Jacobs, D. K. (2017). Introgession between ecologically distinct species following increased salinity in the Colorado Delta- Worldwide implications for impacted estuary diversity. *PeerJ*, 2017(12). <https://doi.org/10.7717/peerj.4056>
- Melet, A., Teatini, P., Le Cozannet, G., Jamet, C., Conversi, A., Benveniste, J., & Almar, R. (2020). Earth Observations for Monitoring Marine Coastal Hazards and Their Drivers. Em *Surveys in Geophysics* 41, 1489–1534. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/s10712-020-09594-5>
- Melo, W., Pinho, J., Iglesias, I., Bio, A., Avilez-Valente, P., Vieira, J., Bastos, L., & Veloso-Gomes, F. (2020). Hydro-and morphodynamic impacts of sea level rise: The Minho estuary case study. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(6). <https://doi.org/10.3390/JMSE8060441>
- Melo, W. (2020). *Análise da Morfodinâmica de Estuários sob o Efeito de Mudanças Climáticas* (Tese de mestrado não publicada). Universidade do Minho.
- Miranda, L. B., Castro, B. M. e Kjerfve, B. (2002) *Princípios De Oceanografia Física De Estuários*. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo. Disponível em: https://books.google.pt/books?hl=en&lr=&id=cpM7IFEOS1sC&oi=fnd&pg=PA11&dq=principios+de+oceanografia+estuários&ots=LsTyaNYXSW&sig=UIW89U4qIR9M6KZ3W6gjc-rNZIQ&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false.
- Pereira, S. C., Marta-Almeida, M., Carvalho, A. C., & Rocha, A. (2020). Extreme precipitation events under climate change in the Iberian Peninsula. *International Journal of Climatology*, 40(2), 1255–1278. <https://doi.org/10.1002/joc.6269>
- Pinho, J. L. (2000). *Aplicação de modelação matemática ao estudo da hidrodinâmica e da qualidade da água em zonas costeiras* (Tese de doutoramento, Universidade do Minho). Disponível em: <http://hdl.handle.net/1822/2798>.
- Soares, P. M. M., Cardoso, R. M., Lima, D. C. A., & Miranda, P. M. A. (2017). Future precipitation in Portugal: high-resolution projections using WRF model and EURO-CORDEX multi-model ensembles. *Climate Dynamics*, 49(7–8), 2503–2530. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3455-2>
- Robins, P. E., Skov, M. W., Lewis, M. J., Gimenez, L., Davies, A. G., Malham, S. K., Neill, S. P., McDonald, J. E., Whitton, T. A., Jackson, S. E., & Jago, C. F. (2015). Impact of climate change on UK estuaries: A review of past trends and potential projections. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 169, 119-135. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.12.016>
- Taborda, R., & Ribeiro, M. A. (2015). A simple model to estimate the impact of sea-level rise on platform beaches. *Geomorphology*, 234, 204–210. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.01.015>

UE, *Directiva 2000/60/CE* do Parlamento Europeu e do Conselho Que Estabelece um Quadro de Acção Comunitária no Domínio da Política da Água. J.O.C. de 22.12.2000.

Vousdoukas, M. I., Mentaschi, L., Voukouvalas, E., Verlaan, M., & Feyen, L. (2017). Extreme sea levels on the rise along Europe's coasts. *Earth's Future*, 5(3), 304–323. <https://doi.org/10.1002/2016EF000505>

Vousdoukas, M. I., Voukouvalas, E., Annunziato, A., Giardino, A., & Feyen, L. (2016). Projections of extreme storm surge levels along Europe. *Climate Dynamics*, 47(9–10), 3171–3190. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3019-5>

Yang, Z., Wang, T., Voisin, N., Copping, A. (2015). Estuarine response to riverflow and sea-level rise under future climate change and human development. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 156, 19–30. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2014.08.015>

Apêndice A – Configurações do modelo

Neste apêndice, serão apresentadas figuras referentes as configurações utilizadas no programa *Delft3D* de modo que dados utilizados na configuração do modelo não abordados anteriormente possam ser consultados no caso de necessidade da reprodução dos resultados.

The screenshot displays the 'Domain' configuration window in Delft3D. On the left, a vertical menu lists various configuration sections: Description, Domain (highlighted), Time frame, Processes, Initial conditions, Boundaries, Physical parameters, Numerical parameters, Operations, Monitoring, Additional parameters, and Output. The main area is titled 'Grid' and contains sub-tabs for 'Bathymetry', 'Dry points', and 'Thin dams'. Under the 'Grid' tab, there are two buttons: 'Open grid' and 'Open grid enclosure', each with a corresponding file path. Below these buttons, the following parameters are configured: 'Co-ordinate system' is set to 'Cartesian'; 'Grid points in M-direction' is 103; 'Grid points in N-direction' is 468; 'Latitude' is 43 [dec. deg]; 'Orientation' is 0 [dec. deg]; and 'Number of layers' is 1.

Figura A1. Configuração da secção *Domain* no modelo.

The screenshot displays the 'Time frame' configuration window in Delft3D. The left sidebar is identical to the previous screenshot, with 'Time frame' selected. The main area is titled 'Time frame' and contains the following configuration parameters: 'Reference date' is 01 10 2019 [dd mm yyyy]; 'Simulation start time' is 01 10 2019 00 00 00 [dd mm yyyy hh mm ss]; 'Simulation stop time' is 01 12 2019 00 00 00 [dd mm yyyy hh mm ss]; 'Time step' is 1 [min]; and 'Local time zone (LTZ)' is 0 +GMT. A note at the bottom states 'GMT = Local time - LTZ'.

Figura A2. Configuração da secção *Time frame* no modelo

Figura A3. Configurações da fronteira oceânica.

Tabela A1. Tabela completa das constituintes harmónicas utilizada

Constituinte	Amplitude (m)	Fase (°)
M2	1.397	22.016
S2	0.864	112.860
N2	0.510	55.391
K2	1.229	102.482
K1	0.074	66.159
O1	0.059	52.759
P1	0.021	57.457
Q1	0.019	265.428
MF	0.005	182.796
MM	0.003	189.193
M4	0.007	223.320
MS4	0.003	316.307
MN4	0.002	145.587

Boundaries

Mar 0			
Fluvial			

Section name:

M1: N1:
M2: N2:

Flow conditions

Type of open boundary (quantity):

Reflection parameter alpha: [s]

Forcing type:

Transport conditions

Thatcher-Harleman time lag: [min]

Figura A4. Configurações da fronteira fluvial.

Numerical parameters

Drying and flooding check at: Grid cell centres and faces
 Grid cell faces only

Depth at grid cell faces:

Threshold depth: [m]

Marginal depth: [m]

Smoothing time: [min]

Advection scheme for momentum:

Threshold depth for critical flow limiter: [m]

Advection scheme for transport:

Forester filter (horizontal)

Figura A5. Configurações dos parâmetros numéricos

Apêndice B – Figuras e mapas dos resultados

Nesse apêndice, são apresentadas figuras dos resultados de forma mais completa.

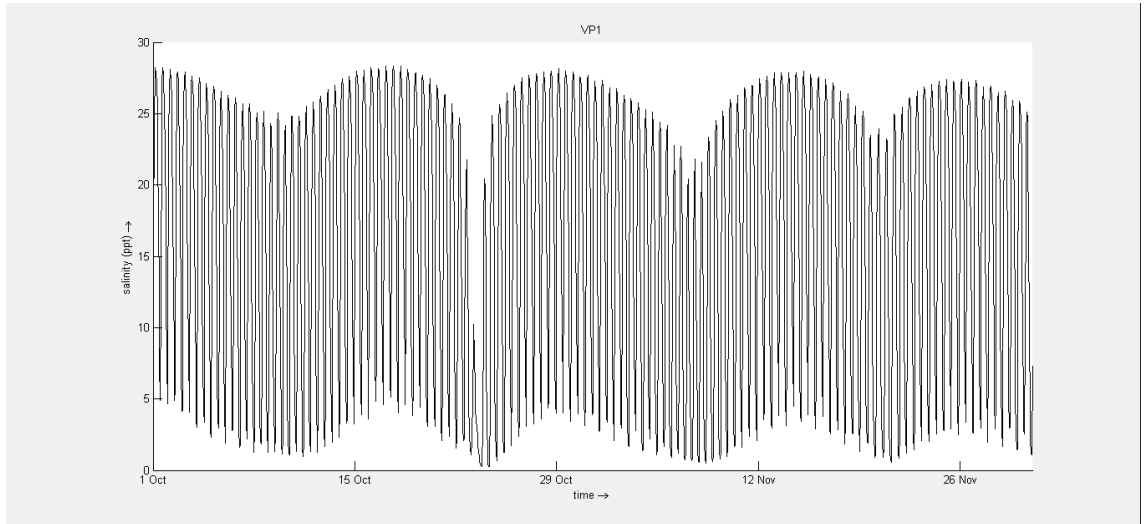


Figura B1. Resultados do cenário C1 (NMM = 0 m, Caudal = 300 m³/s) no ponto VP1.

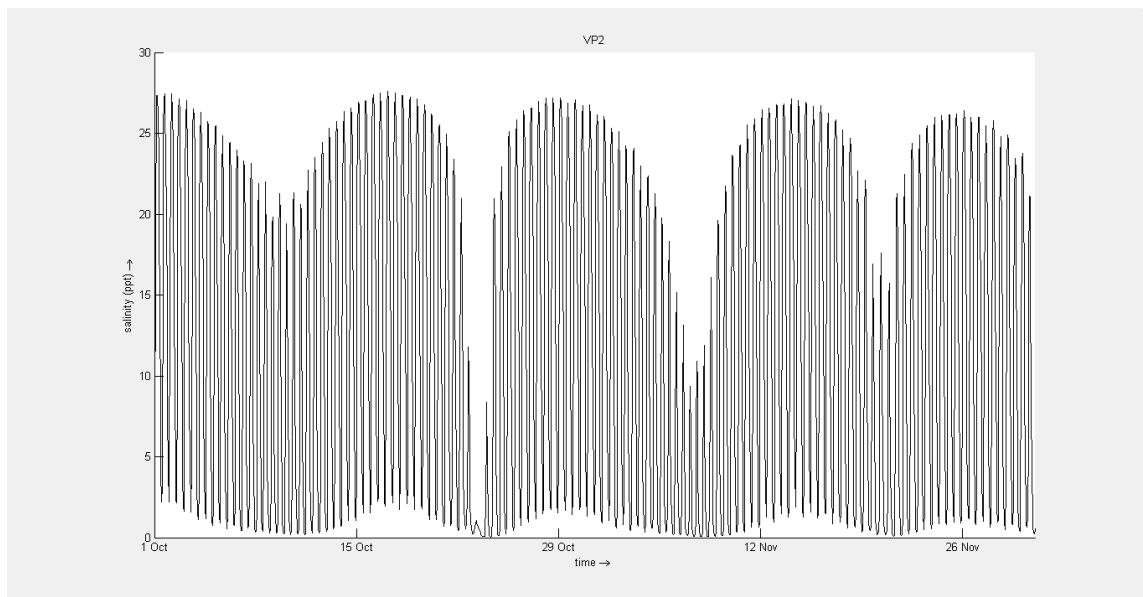


Figura B2. Resultados do cenário C1 (NMM = 0 m, Caudal = 300 m³/s) no ponto VP2.

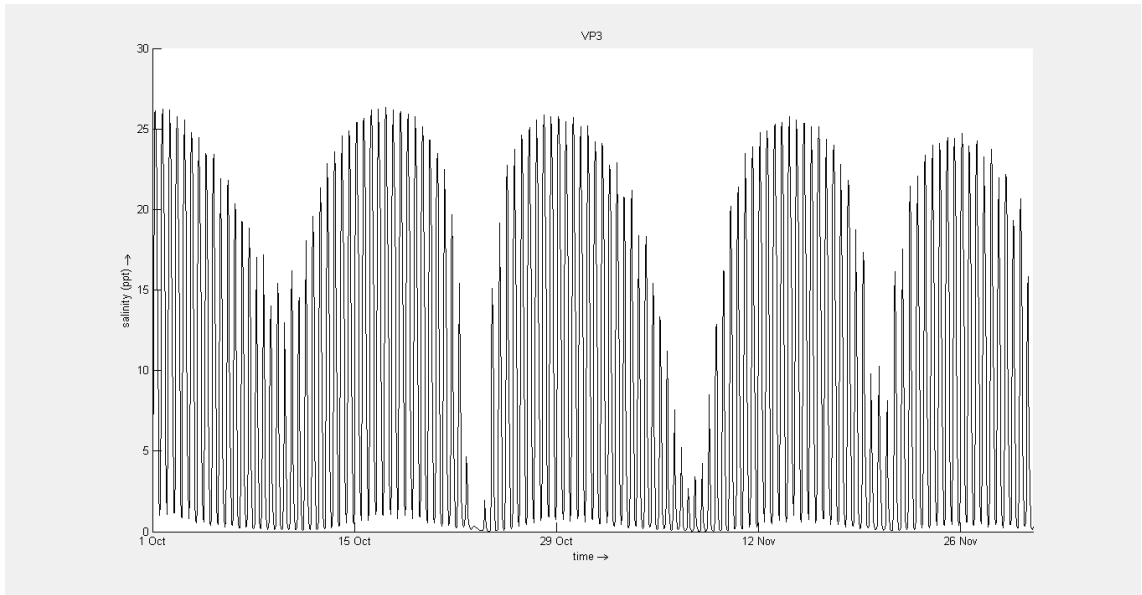


Figura B3. Resultados do cenário C1 (NMM = 0 m, Caudal = 300 m³/s) no ponto VP3.

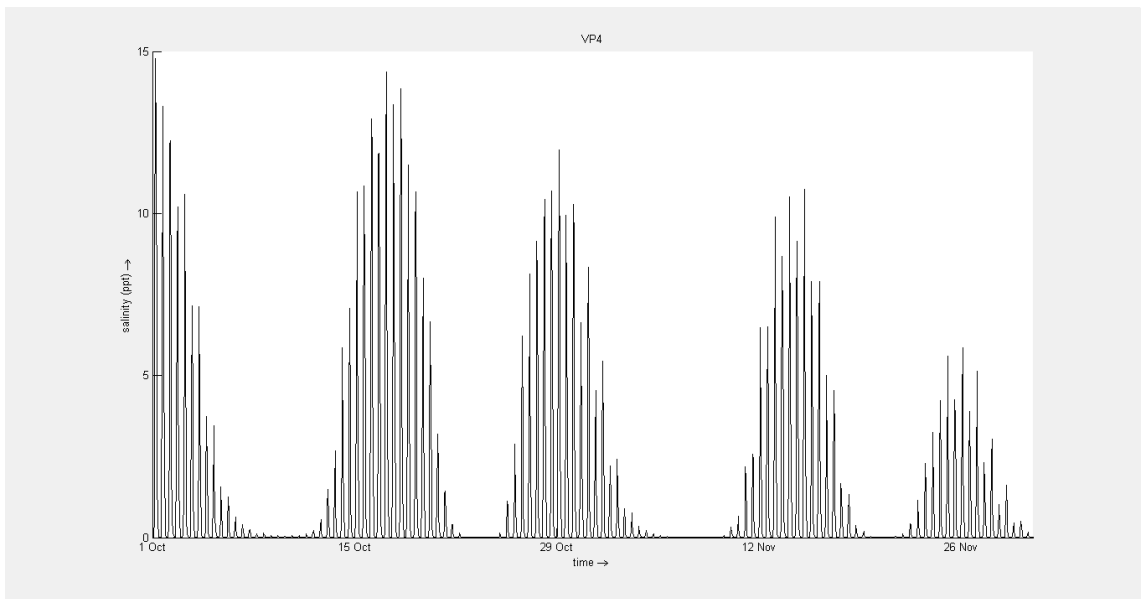


Figura B4. Resultados do cenário C1 (NMM = 0 m, Caudal = 300 m³/s) no ponto VP4.

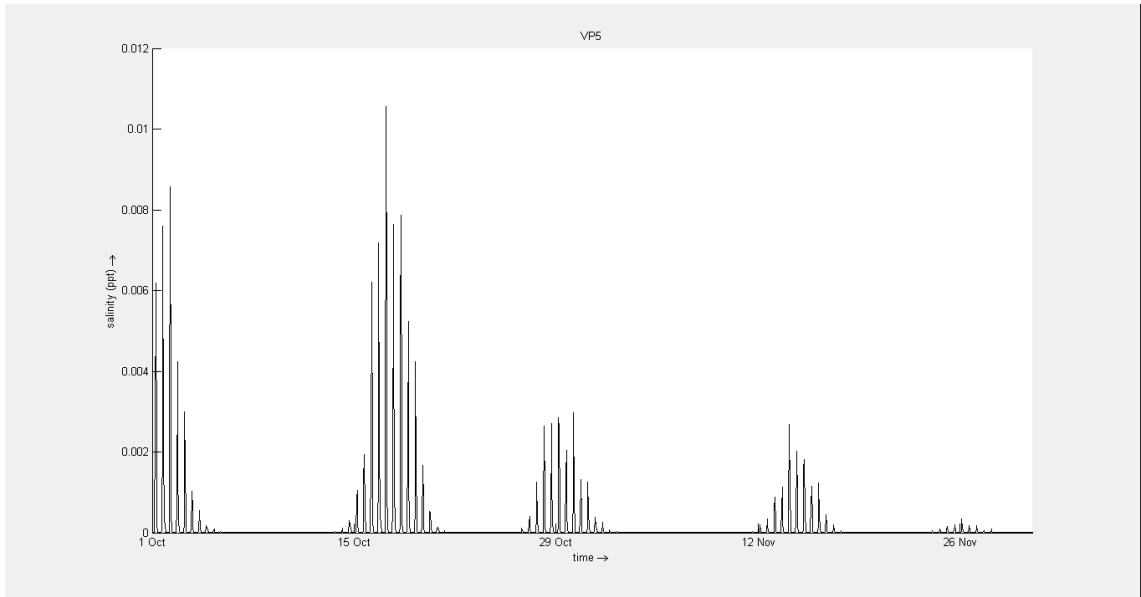


Figura B5. Resultados do cenário C1 (NMM = 0 m, Caudal = 300 m³/s) no ponto VP5.

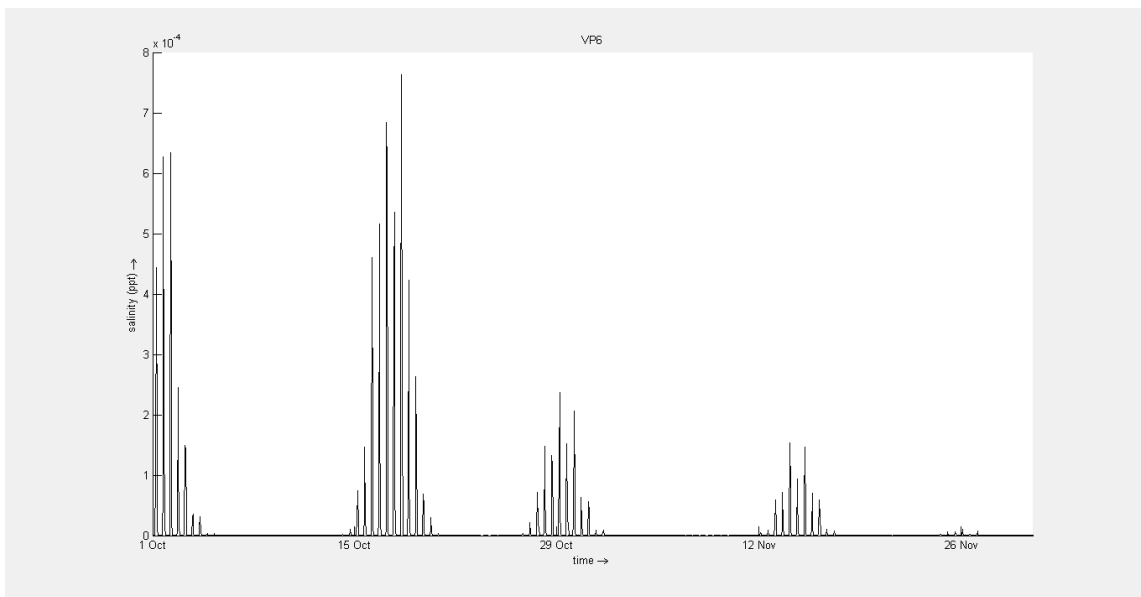


Figura B6. Resultados do cenário C1 (NMM = 0 m, Caudal = 300 m³/s) no ponto VP6.

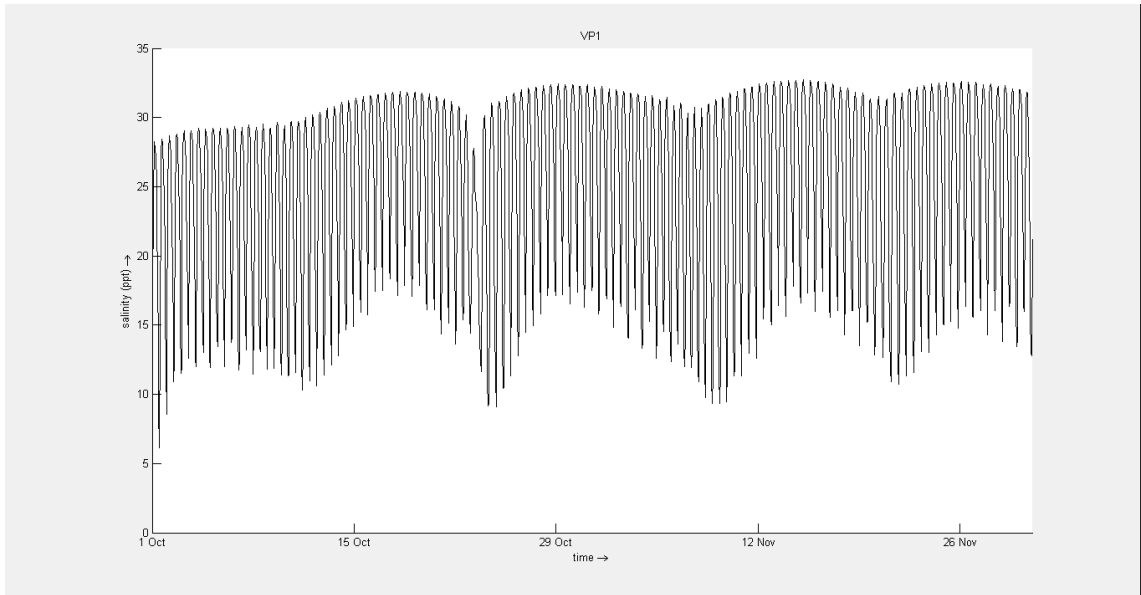


Figura B7. Resultados do cenário C2 (NMM = 0 m, Caudal = 100 m³/s) no ponto VP1.

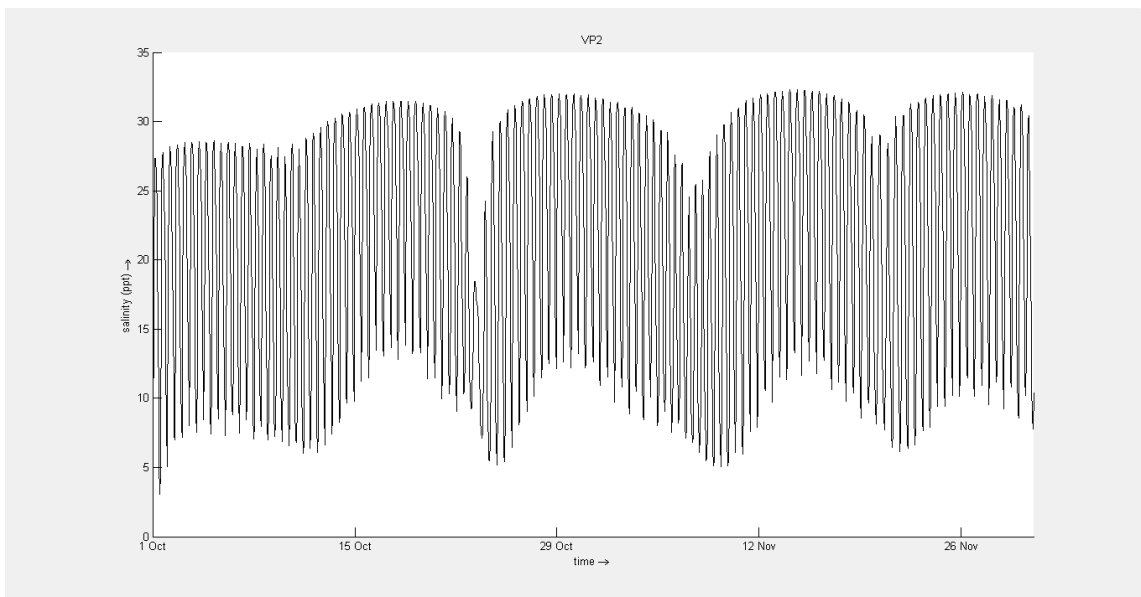


Figura B8. Resultados do cenário C2 (NMM = 0 m, Caudal = 100 m³/s) no ponto VP2.

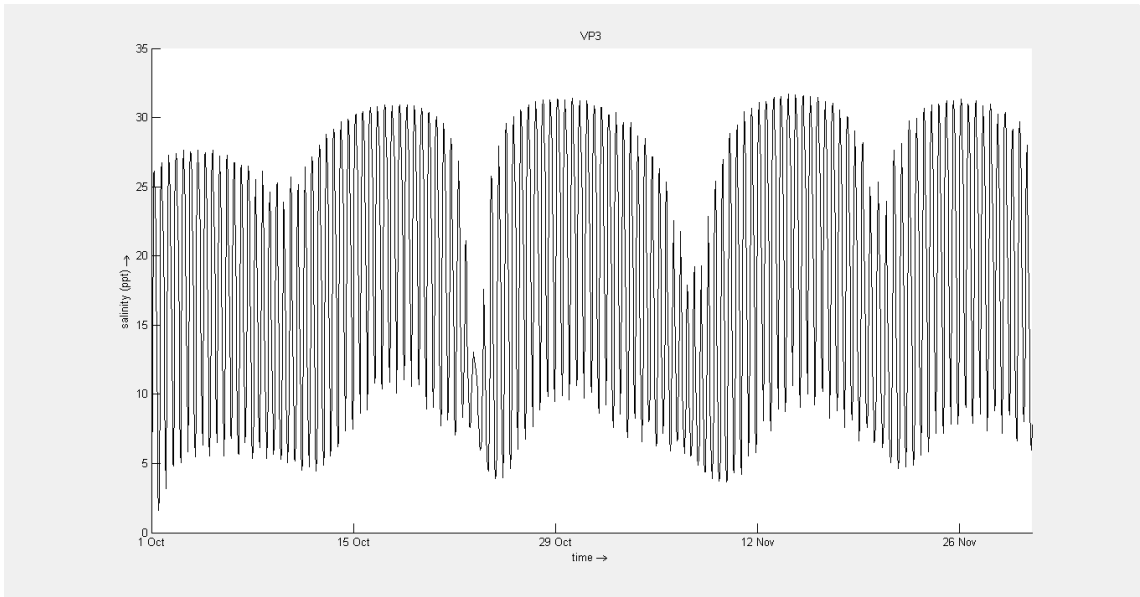


Figura B9. Resultados do cenário C2 (NMM = 0 m, Caudal = 100 m³/s) no ponto VP3.

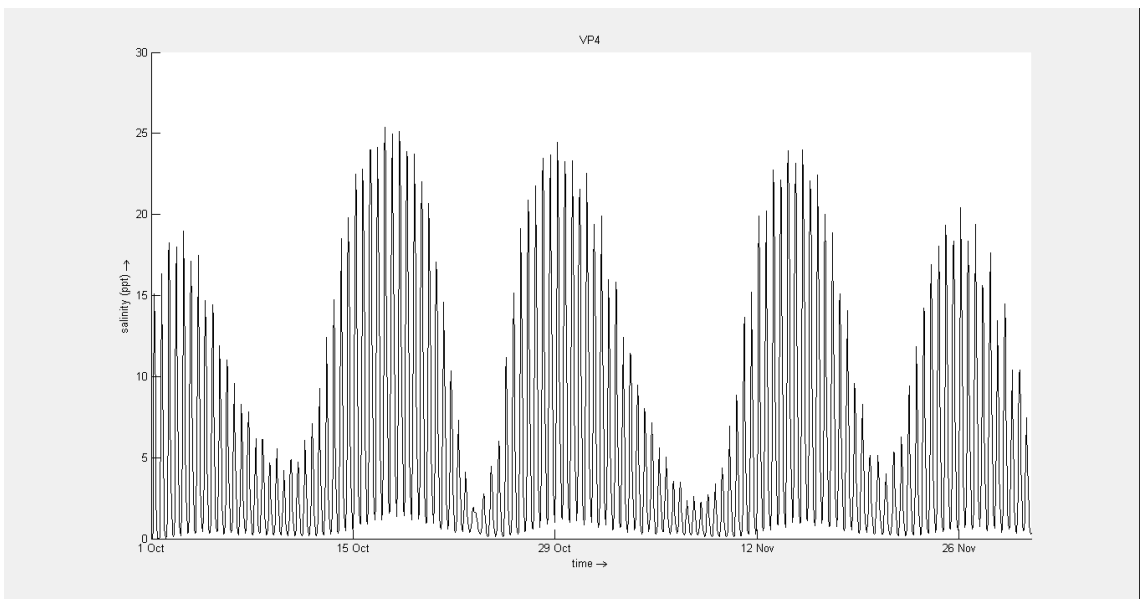


Figura B10. Resultados do cenário C2 (NMM = 0 m, Caudal = 100 m³/s) no ponto VP4.

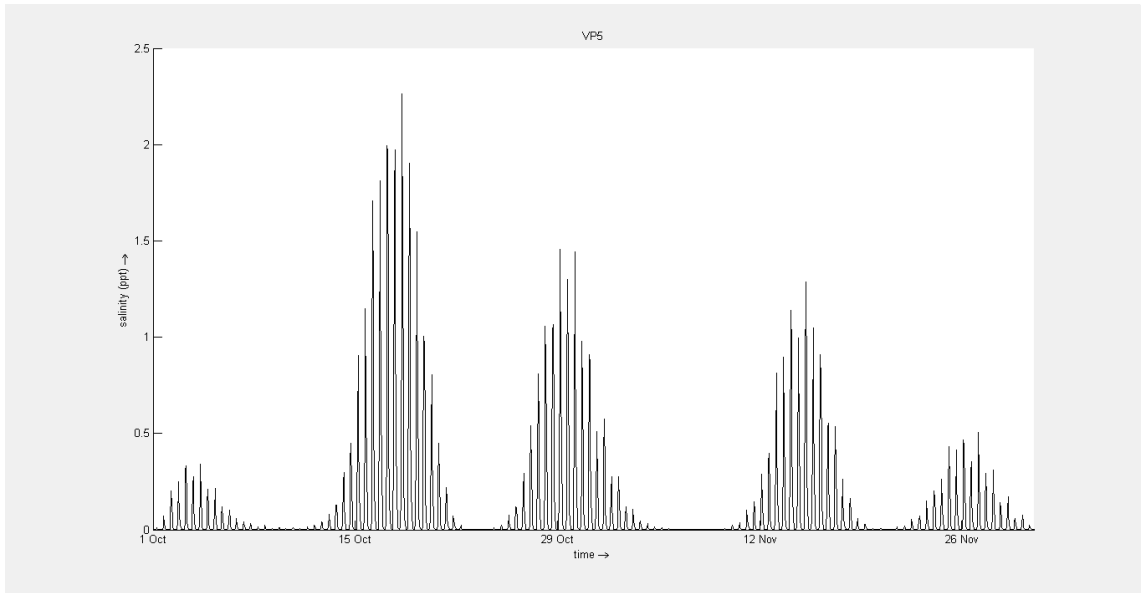


Figura B11. Resultados do cenário C2 (NMM = 0 m, Caudal = 100 m³/s) no ponto VP5.

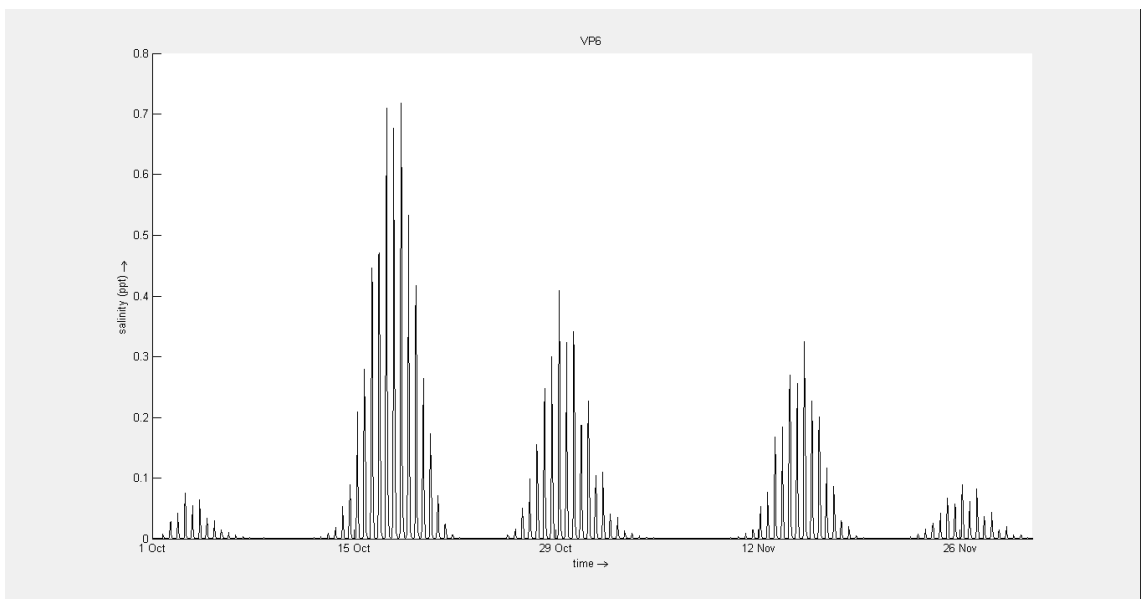


Figura B12. Resultados do cenário C2 (NMM = 0 m, Caudal = 100 m³/s) no ponto VP6.

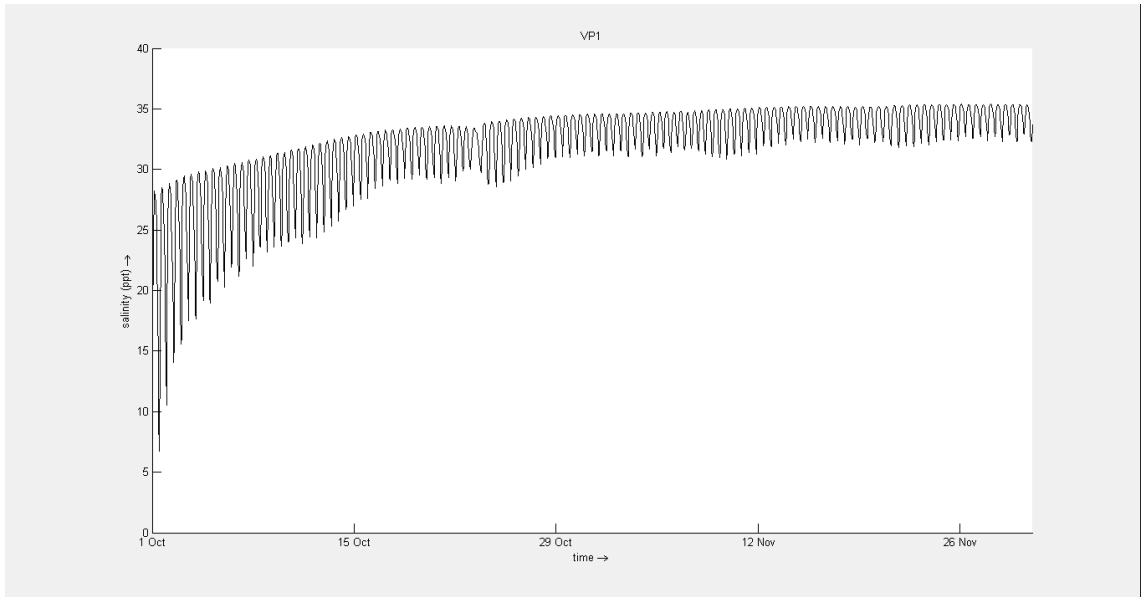


Figura B13. Resultados do cenário C2b (NMM = 0 m, Caudal = 10 m³/s) no ponto VP1.

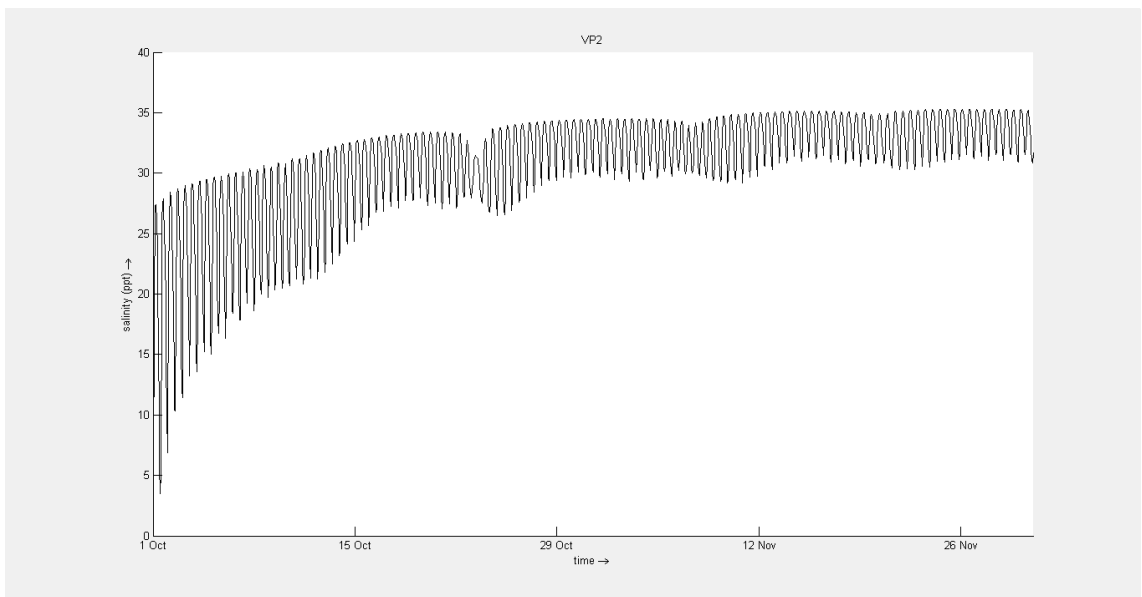


Figura B14. Resultados do cenário C2b (NMM = 0 m, Caudal = 10 m³/s) no ponto VP2.

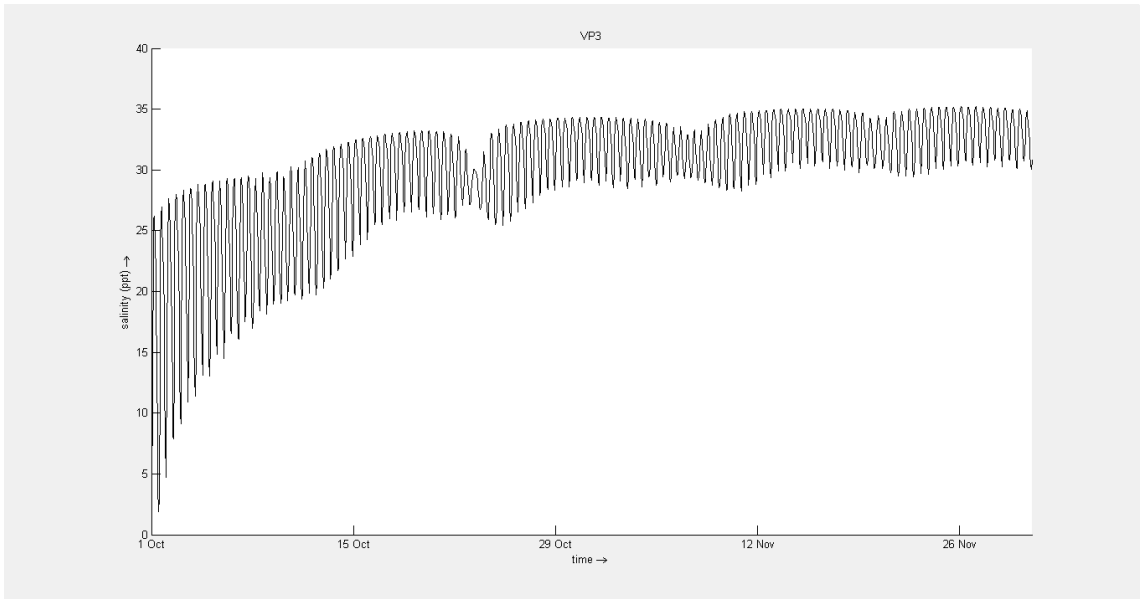


Figura B15. Resultados do cenário C2b (NMM = 0 m, Caudal = 10 m³/s) no ponto VP3.

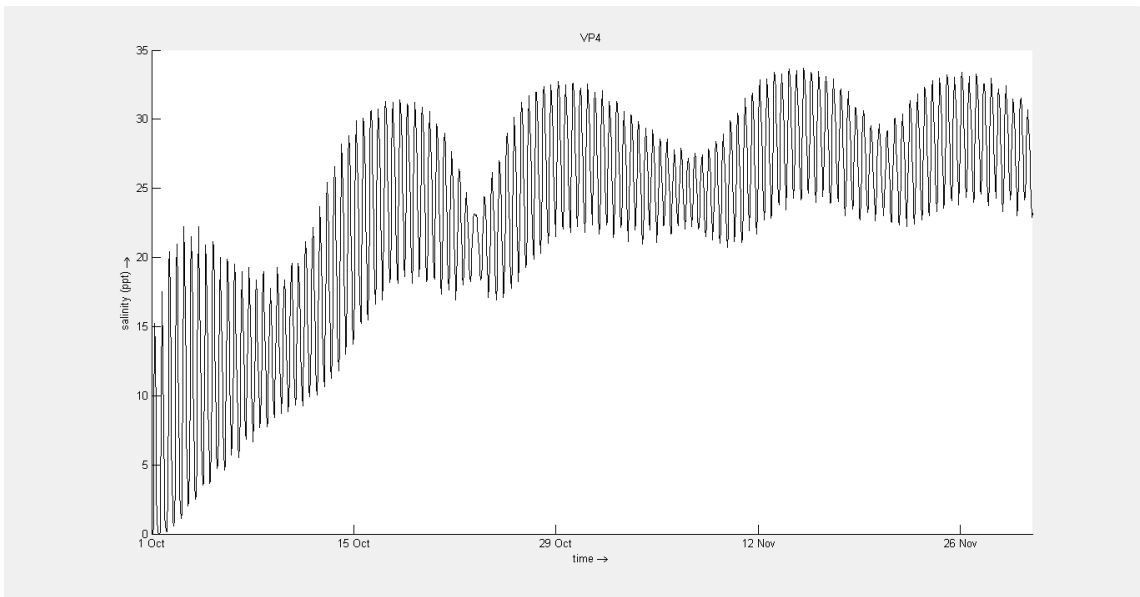


Figura B16. Resultados do cenário C2b (NMM = 0 m, Caudal = 10 m³/s) no ponto VP4.

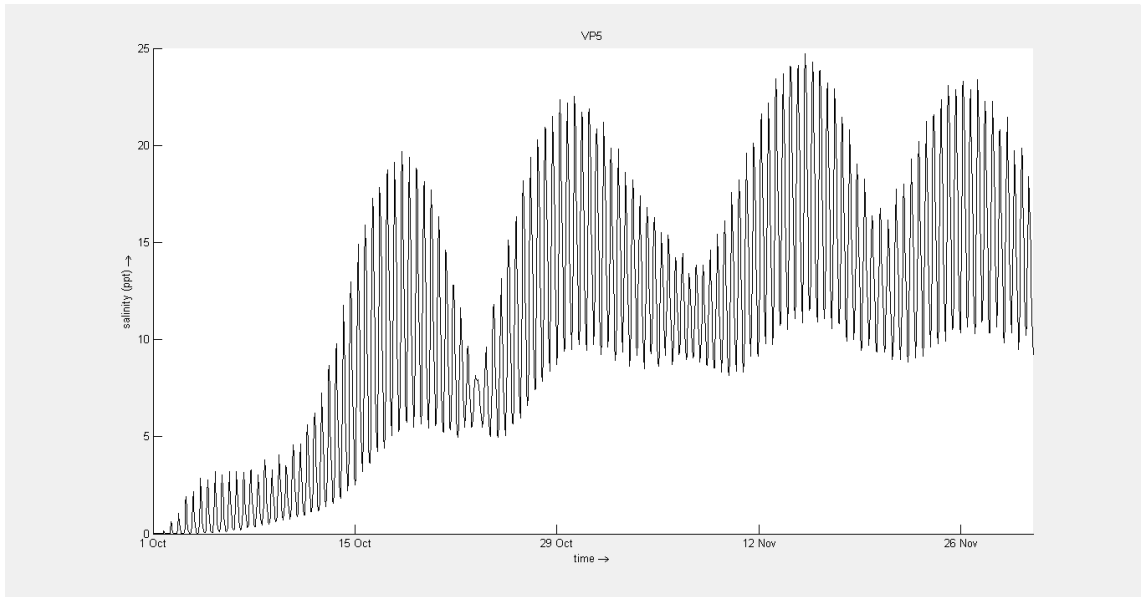


Figura B17. Resultados do cenário C2b (NMM = 0 m, Caudal = 10 m³/s) no ponto VP5.

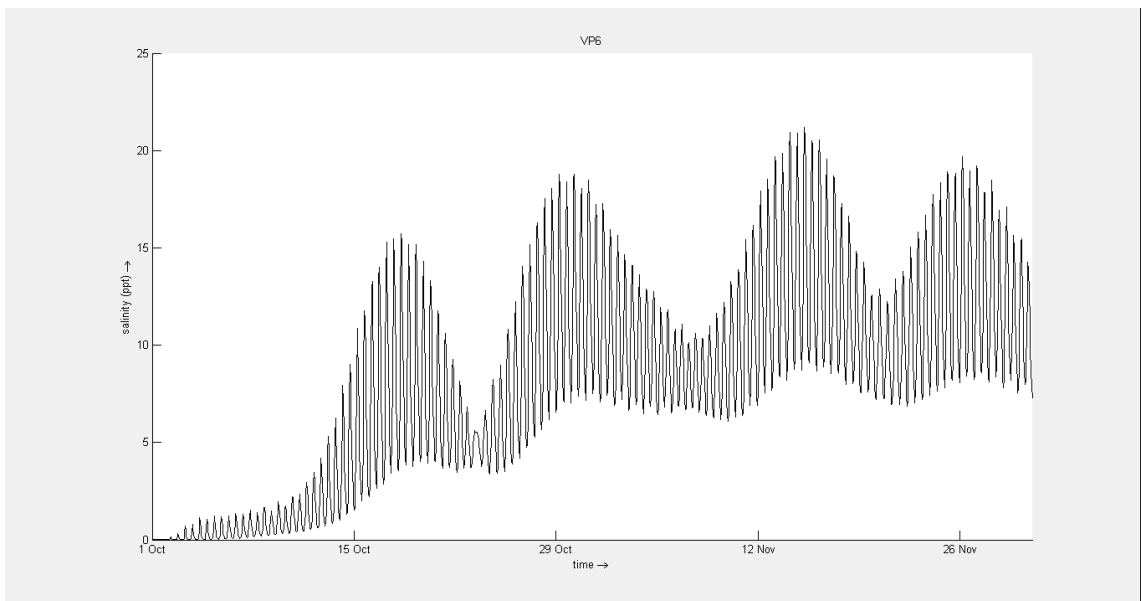


Figura B18. Resultados do cenário C2b (NMM = 0 m, Caudal = 10 m³/s) no ponto VP6.

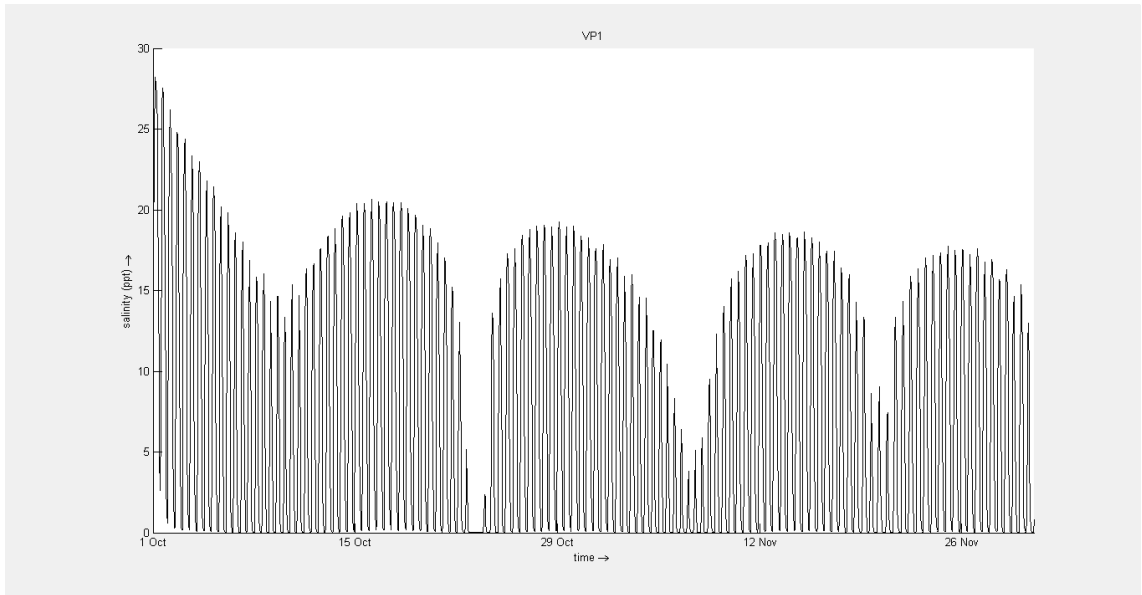


Figura B19. Resultados do cenário C3 (NMM = 0 m, Caudal = 800 m³/s) no ponto VP1.

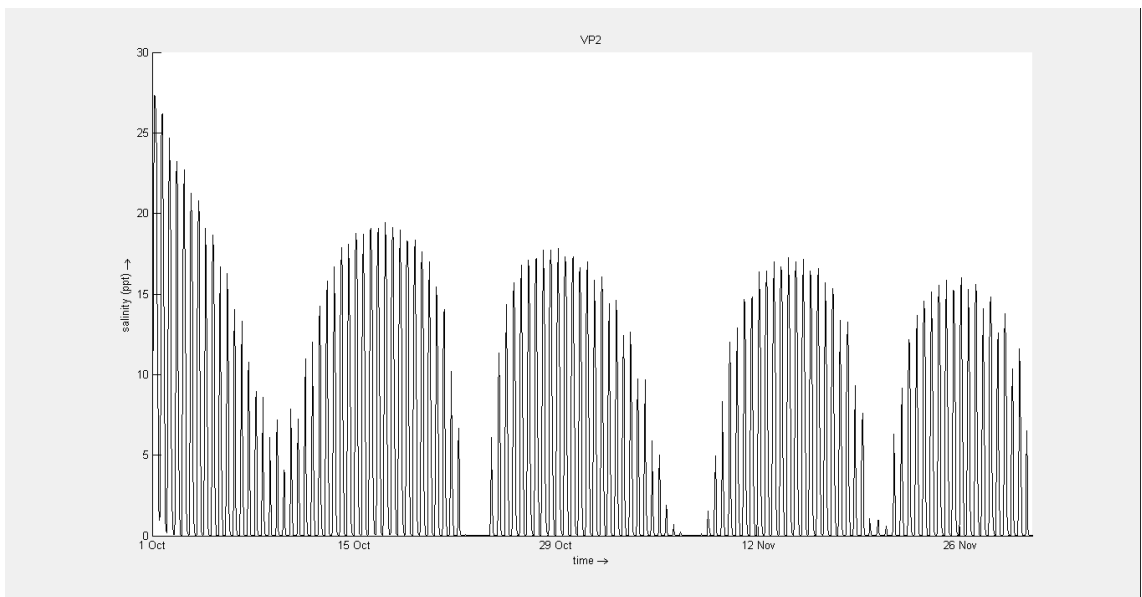


Figura B20. Resultados do cenário C3 (NMM = 0 m, Caudal = 800 m³/s) no ponto VP2.

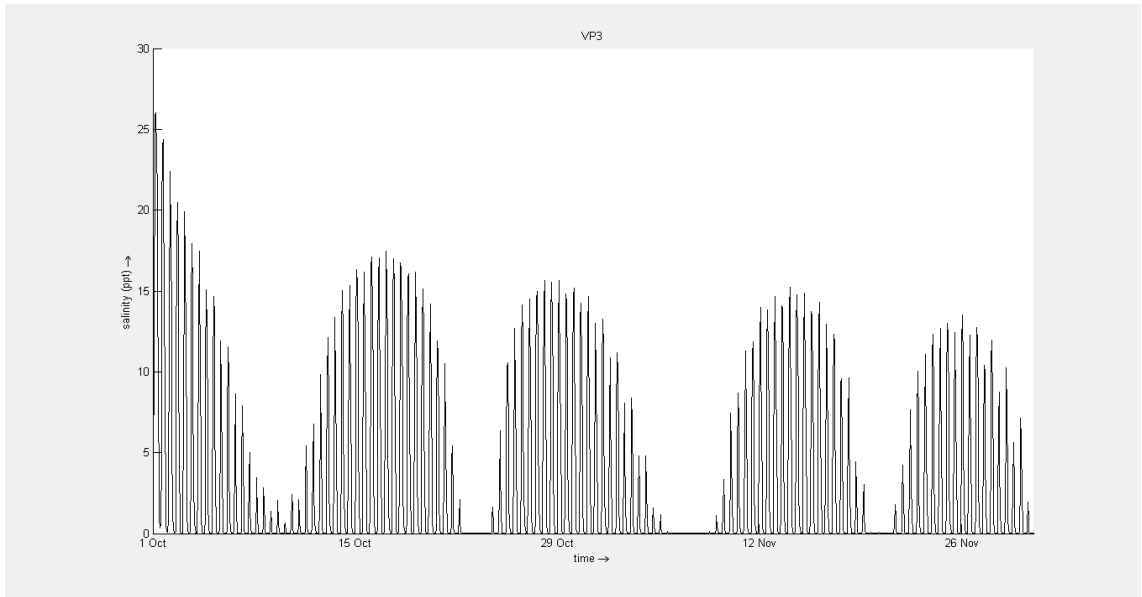


Figura B21. Resultados do cenário C3 (NMM = 0 m, Caudal = 800 m³/s) no ponto VP3.

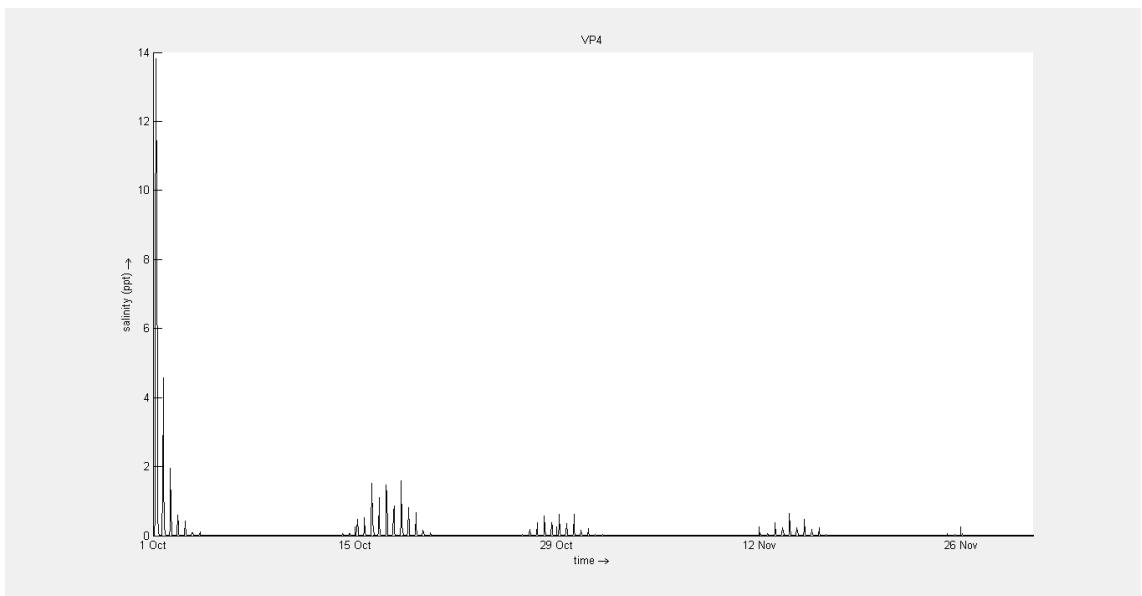


Figura B22. Resultados do cenário C3 (NMM = 0 m, Caudal = 800 m³/s) no ponto VP4.

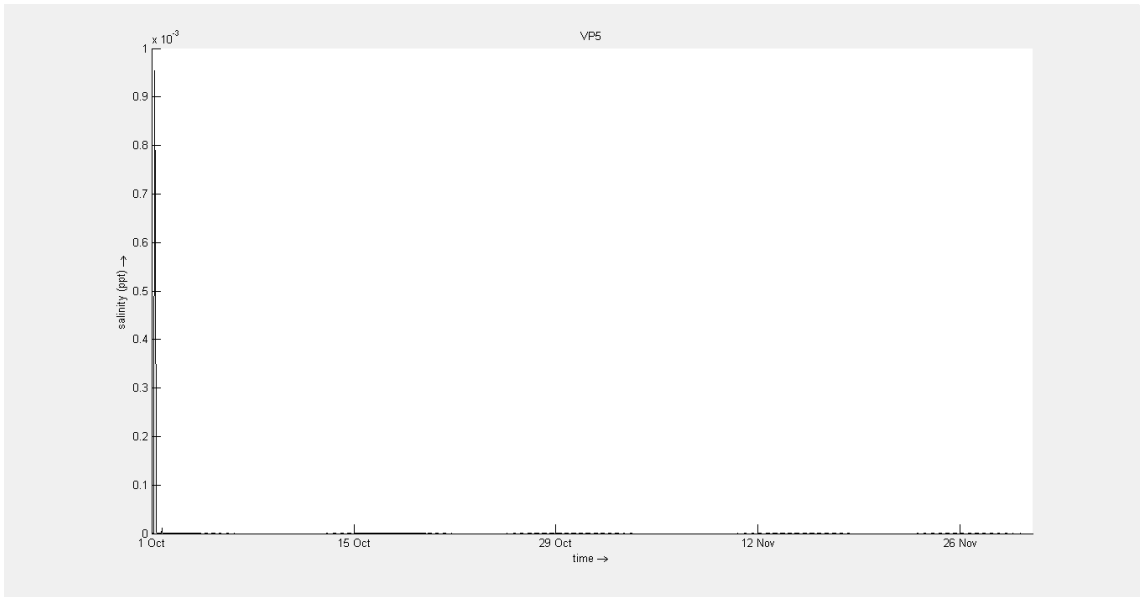


Figura B23. Resultados do cenário C3 (NMM = 0 m, Caudal = 800 m³/s) no ponto VP5.

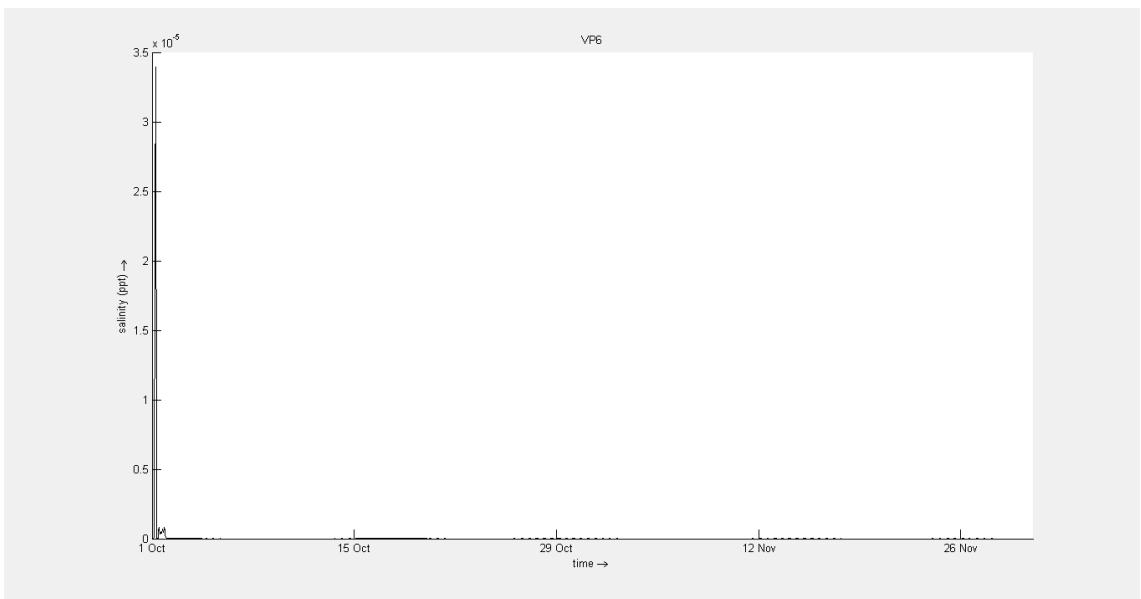


Figura B24. Resultados do cenário C3 (NMM = 0 m, Caudal = 800 m³/s) no ponto VP6.

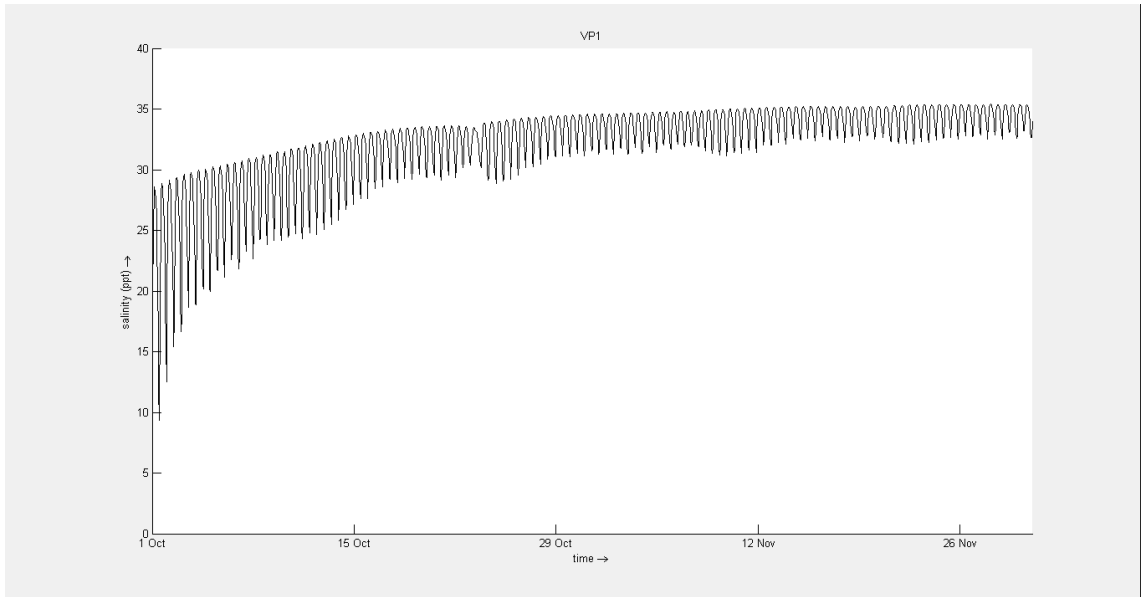


Figura B25. Resultados do cenário C4a (NMM = 0.21 m, Caudal = 10 m³/s) no ponto VP1.

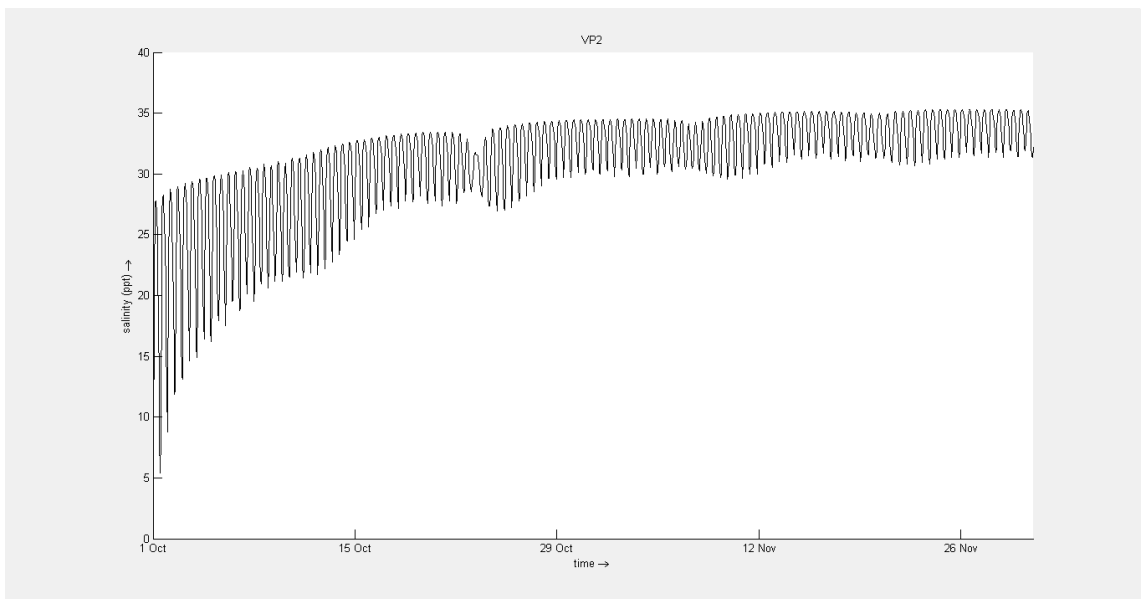


Figura B26. Resultados do cenário C4a (NMM = 0.21 m, Caudal = 10 m³/s) no ponto VP2.

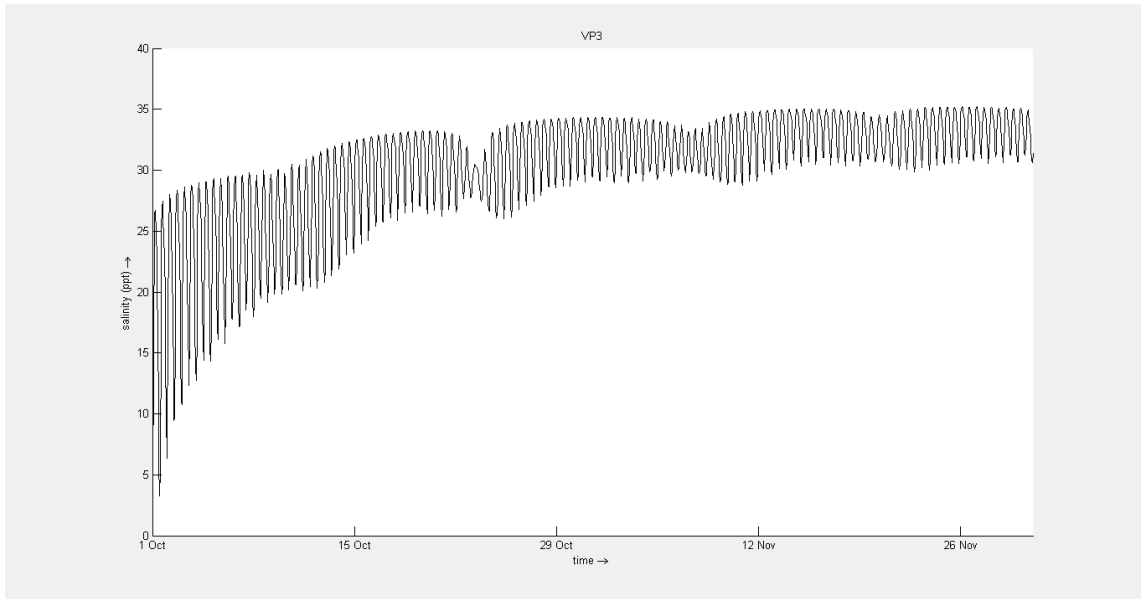


Figura B27. Resultados do cenário C4a (NMM = 0.21 m, Caudal = 10 m³/s) no ponto VP3.

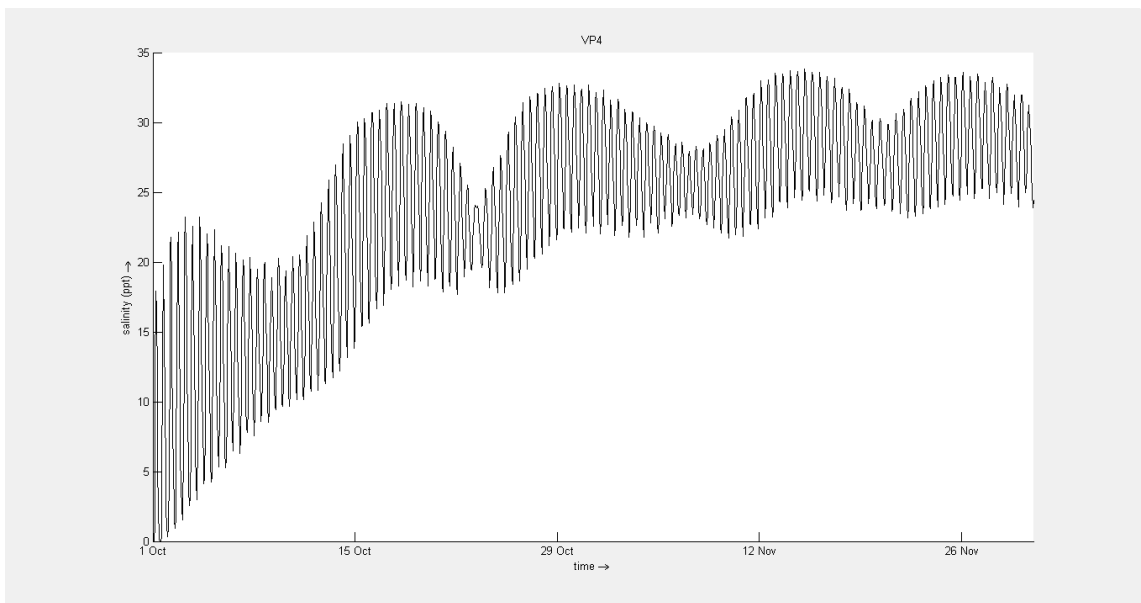


Figura B28. Resultados do cenário C4a (NMM = 0.21 m, Caudal = 10 m³/s) no ponto VP4.

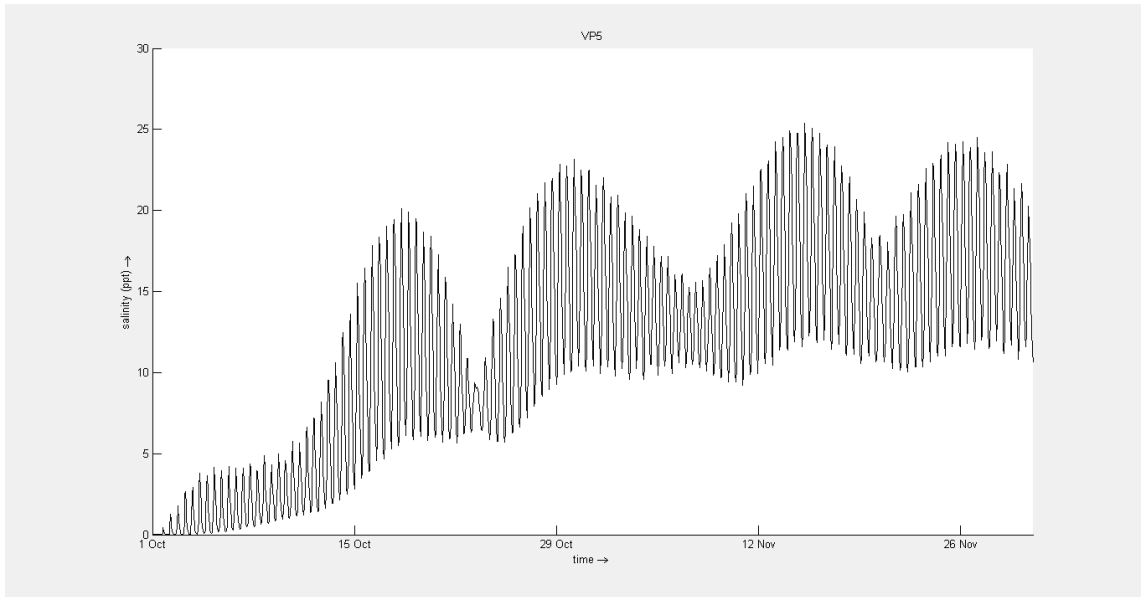


Figura B29. Resultados do cenário C4a (NMM = 0.21 m, Caudal = 10 m³/s) no ponto VP5.

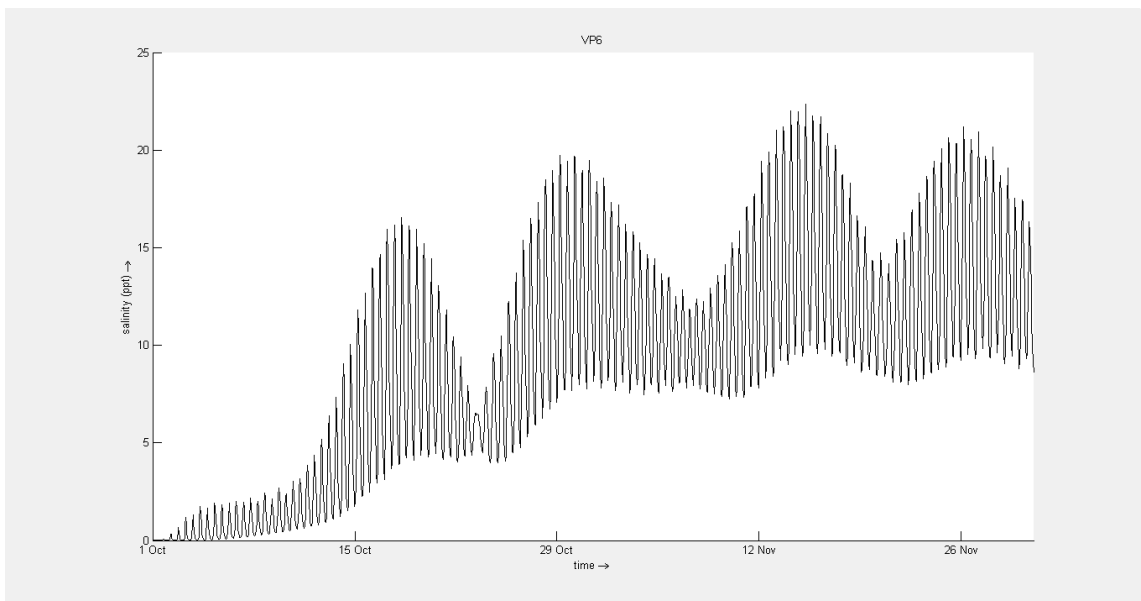


Figura B30. Resultados do cenário C4a (NMM = 0.21 m, Caudal = 10 m³/s) no ponto VP6.

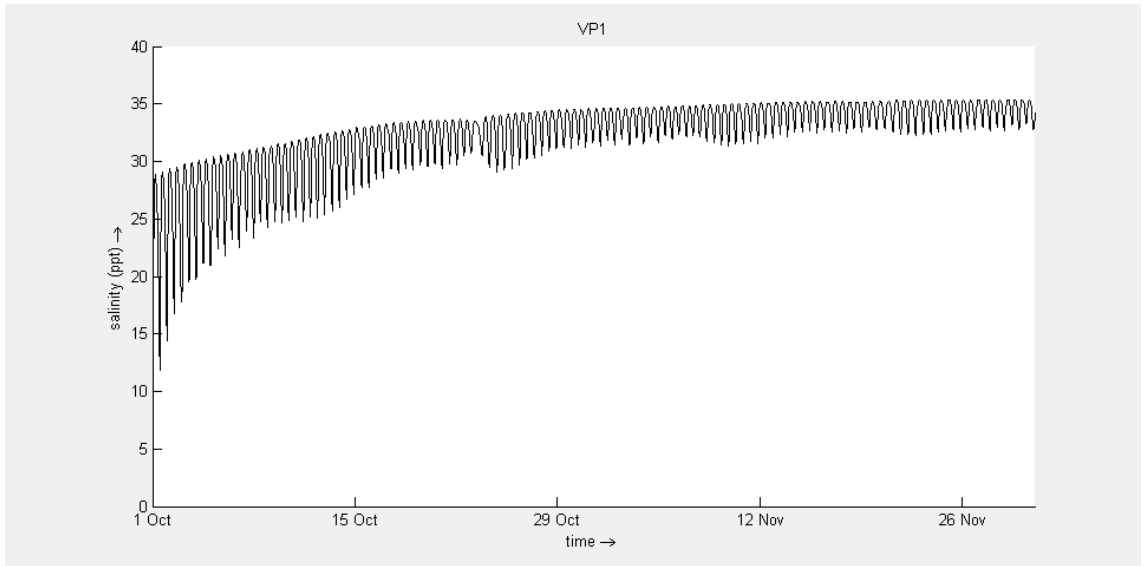


Figura B31. Resultados do cenário C4b (NMM = 0.53 m, Caudal = 10 m³/s) no ponto VP1.

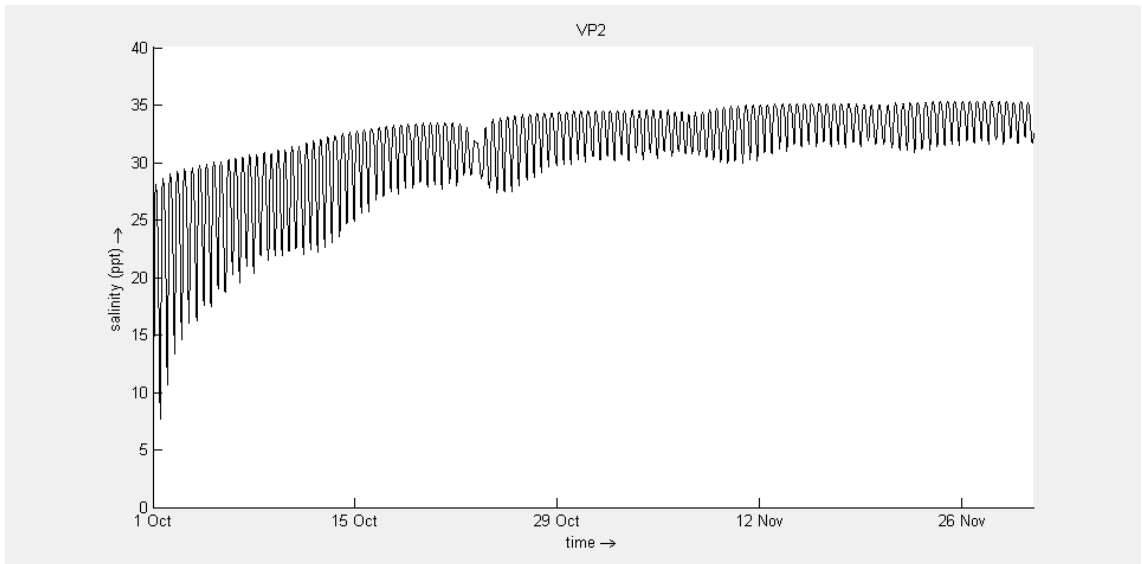


Figura B32. Resultados do cenário C4b (NMM = 0.53 m, Caudal = 10 m³/s) no ponto VP2.

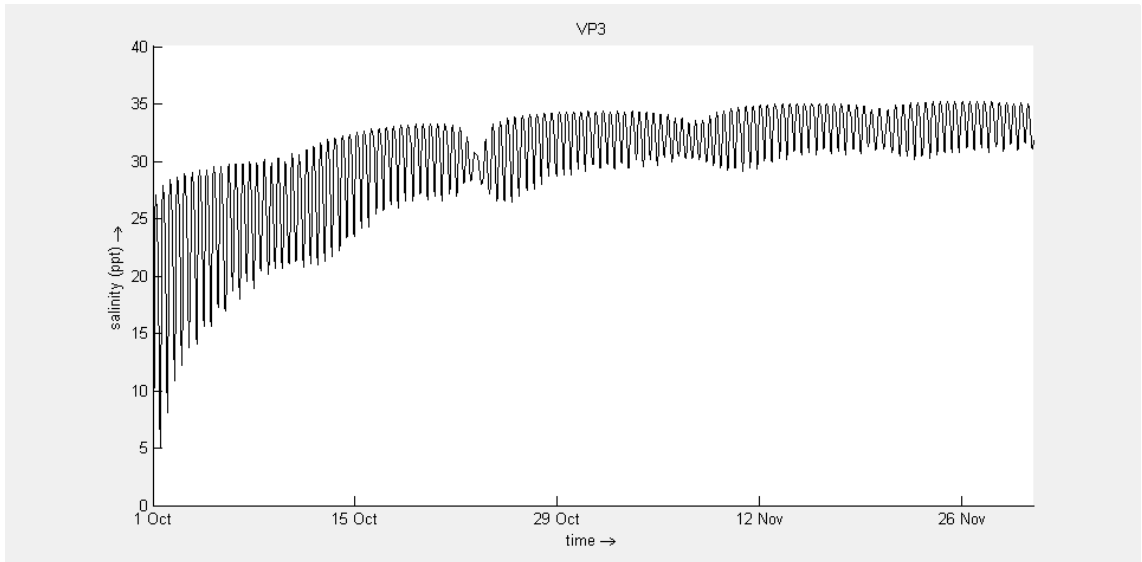


Figura B33. Resultados do cenário C4b (NMM = 0.53 m, Caudal = 10 m³/s) no ponto VP3.

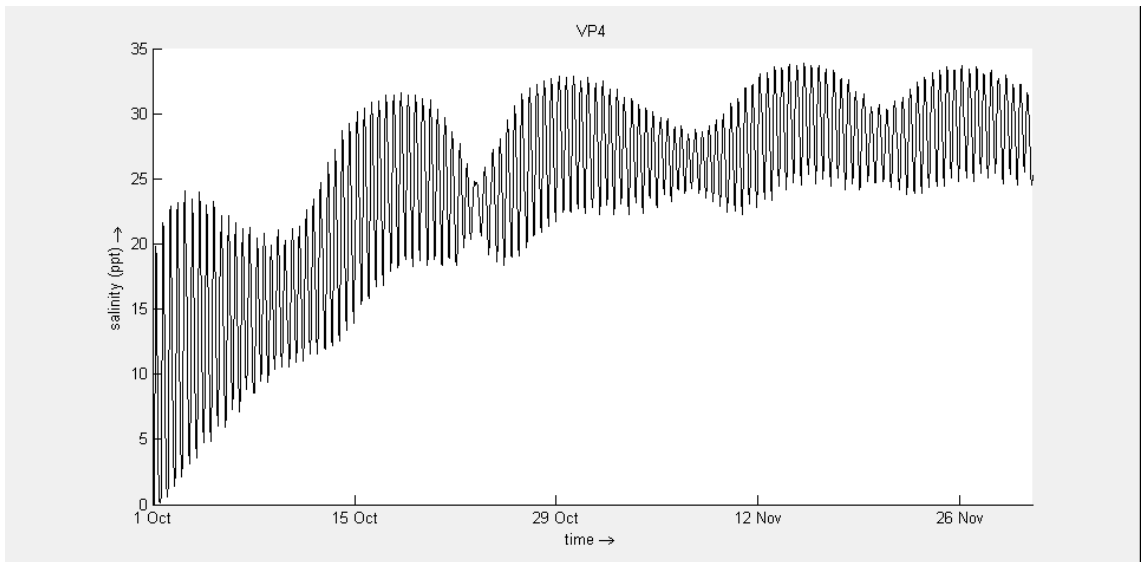


Figura B34. Resultados do cenário C4b (NMM = 0.53 m, Caudal = 10 m³/s) no ponto VP4.

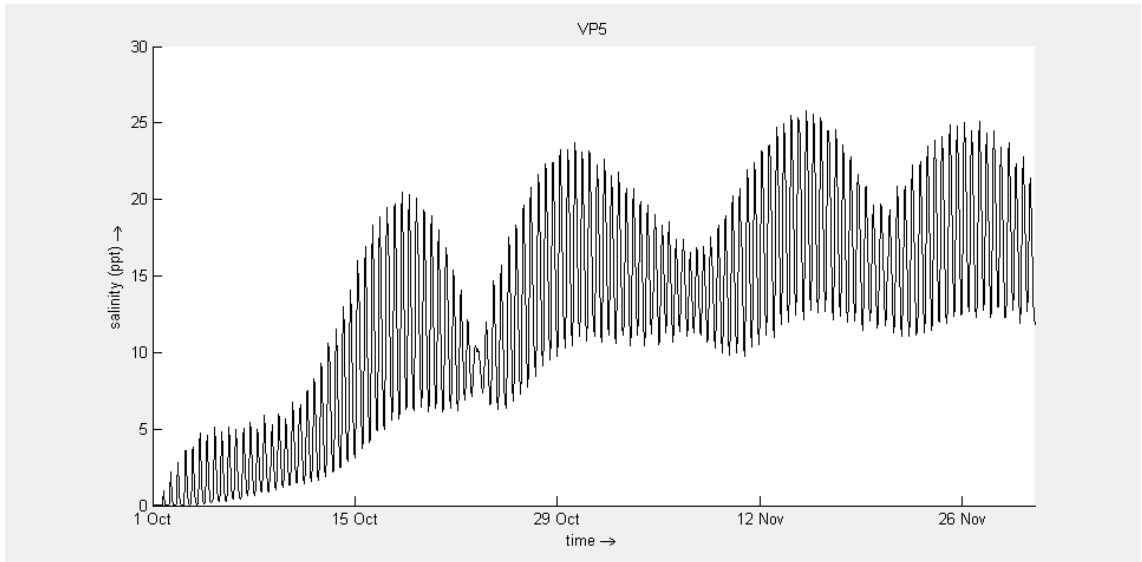


Figura B35. Resultados do cenário C4b (NMM = 0.53 m, Caudal = 10 m³/s) no ponto VP5.

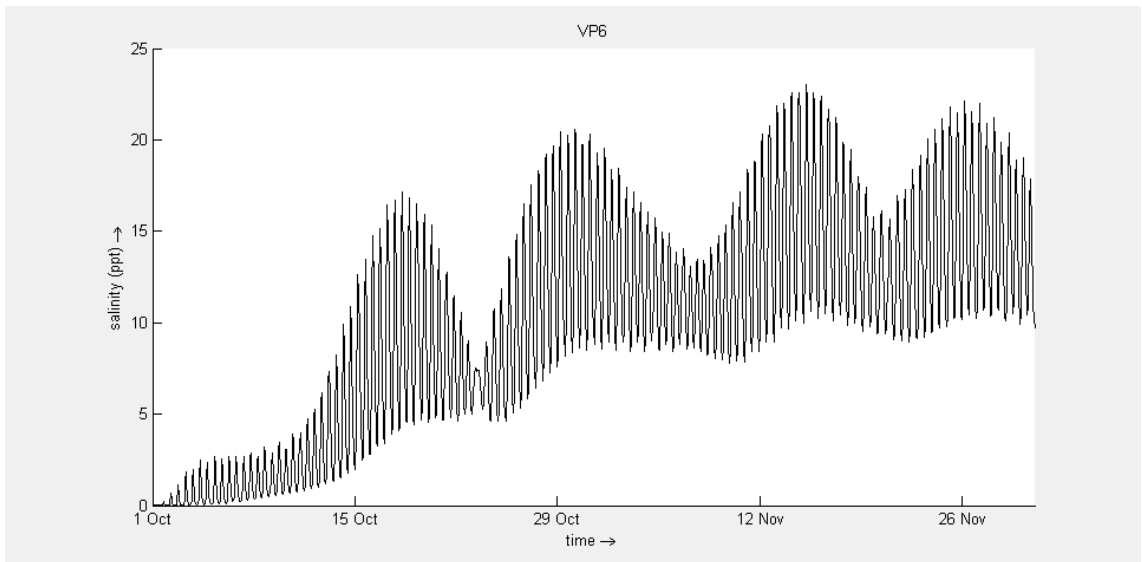


Figura B36. Resultados do cenário C4b (NMM = 0.53 m, Caudal = 10 m³/s) no ponto VP6.

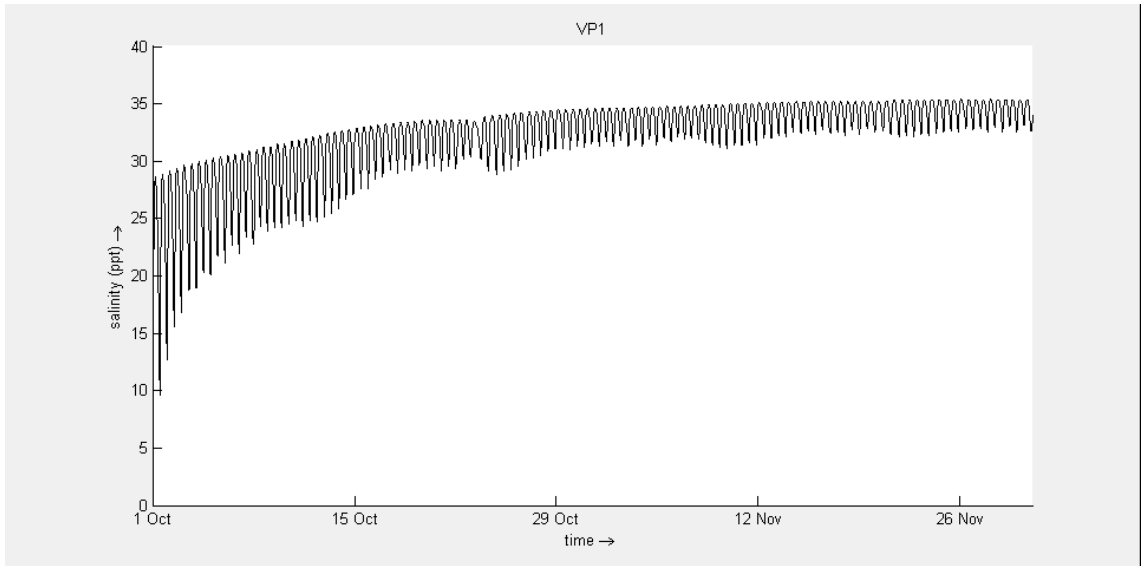


Figura B37. Resultados do cenário C5a (NMM = 0.24 m, Caudal = 10 m³/s) no ponto VP1.

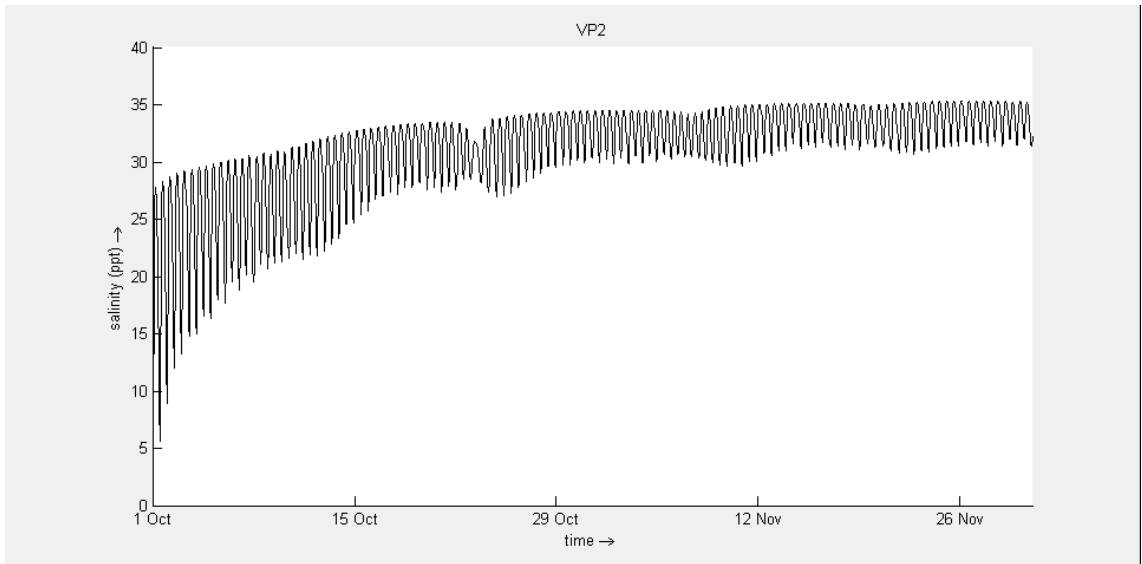


Figura B38. Resultados do cenário C5a (NMM = 0.24 m, Caudal = 10 m³/s) no ponto VP2.

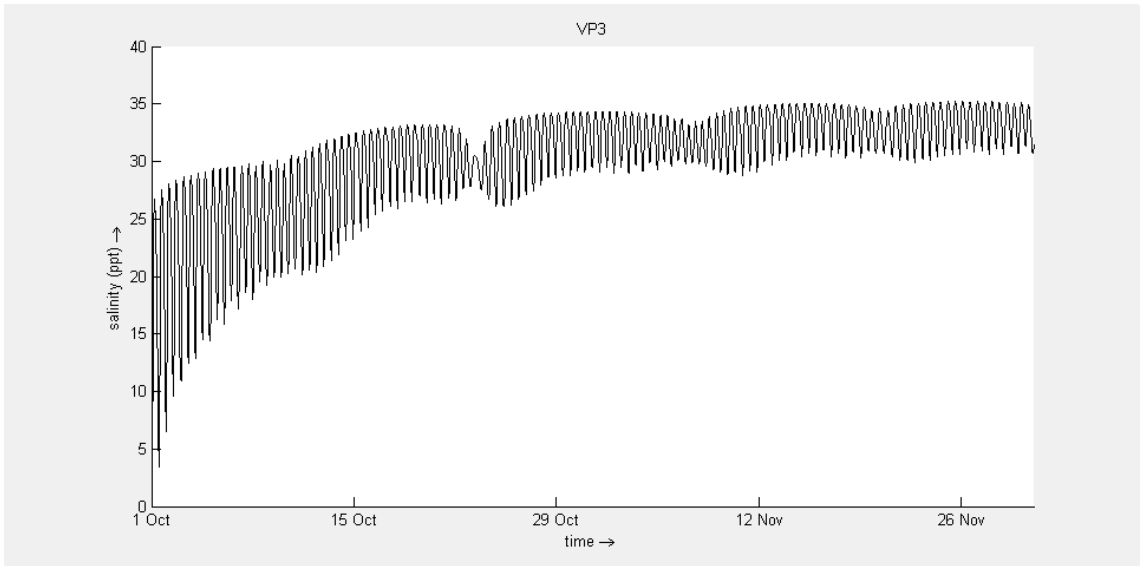


Figura B39. Resultados do cenário C5a (NMM = 0.24 m, Caudal = 10 m³/s) no ponto VP3.

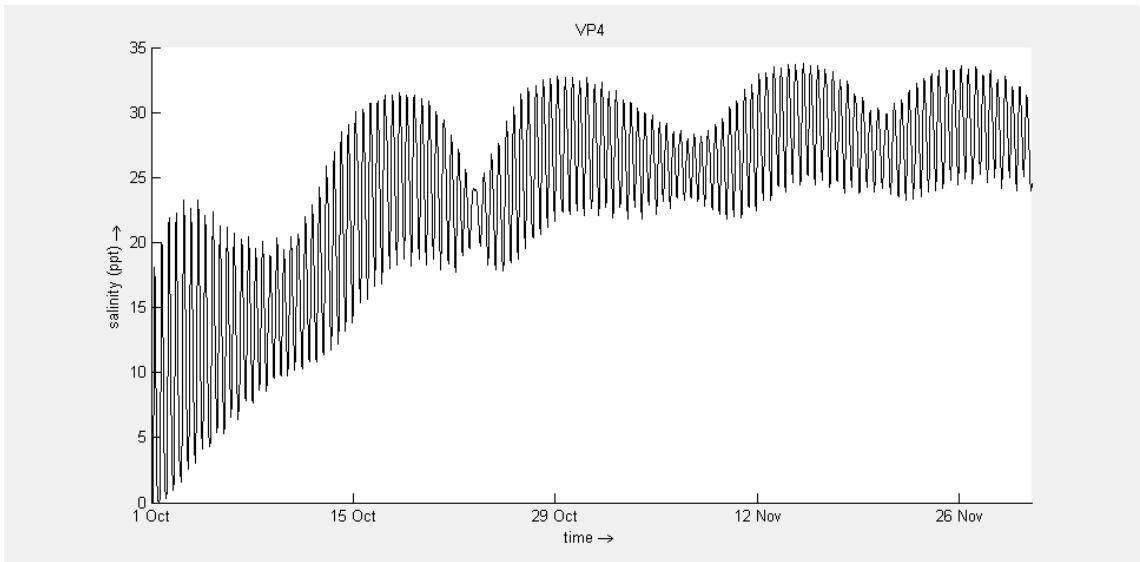


Figura B40. Resultados do cenário C5a (NMM = 0.24 m, Caudal = 10 m³/s) no ponto VP4.

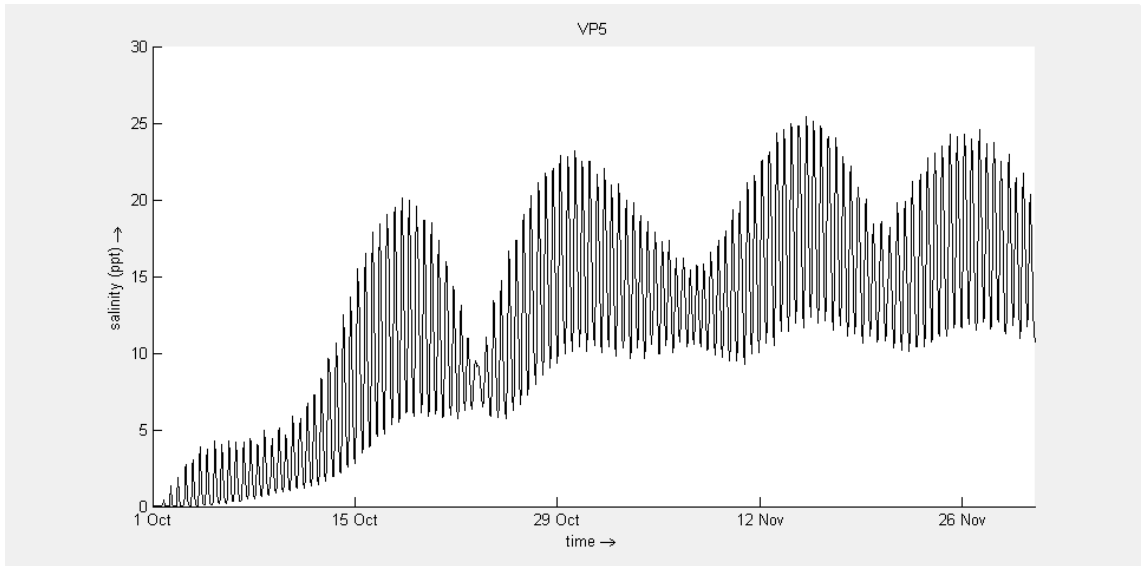


Figura B41. Resultados do cenário C5a (NMM = 0.24 m, Caudal = 10 m³/s) no ponto VP5.

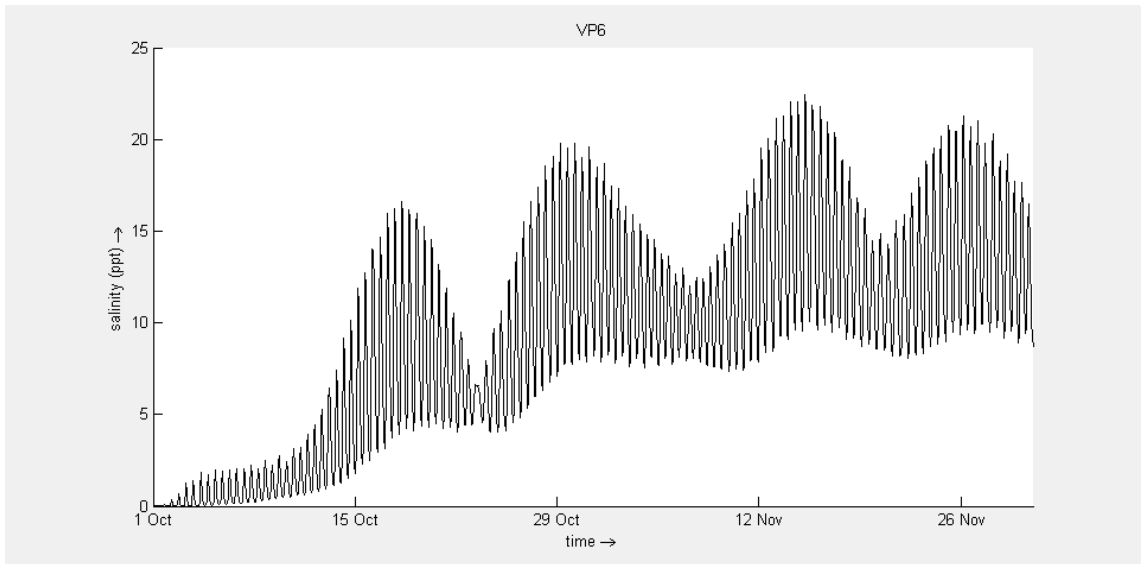


Figura B42. Resultados do cenário C5a (NMM = 0.24 m, Caudal = 10 m³/s) no ponto VP6.

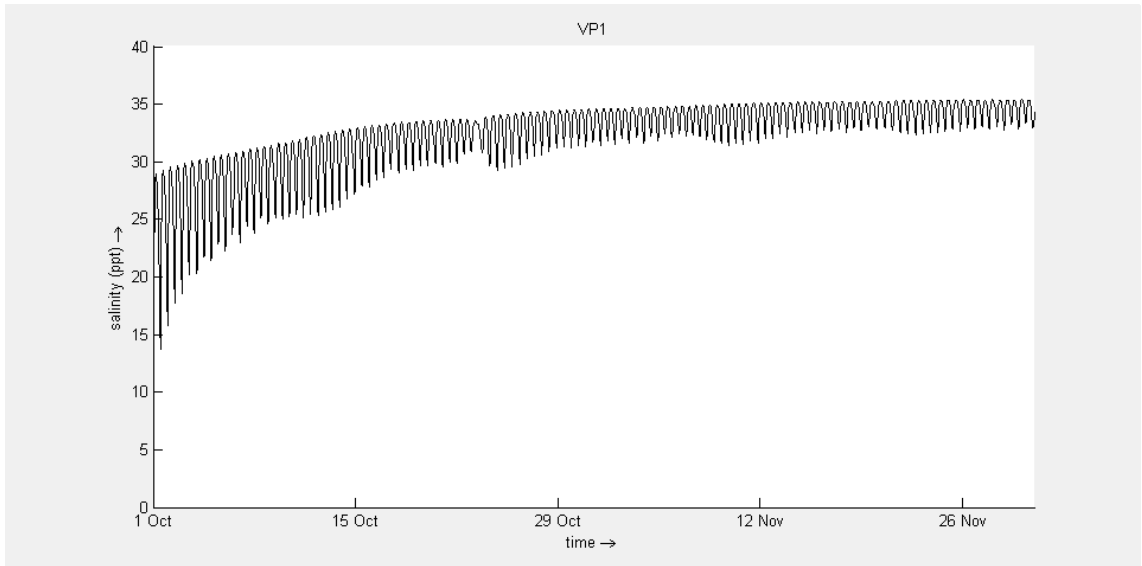


Figura B43. Resultados do cenário C5b (NMM = 0.77 m, Caudal = 10 m³/s) no ponto VP1.

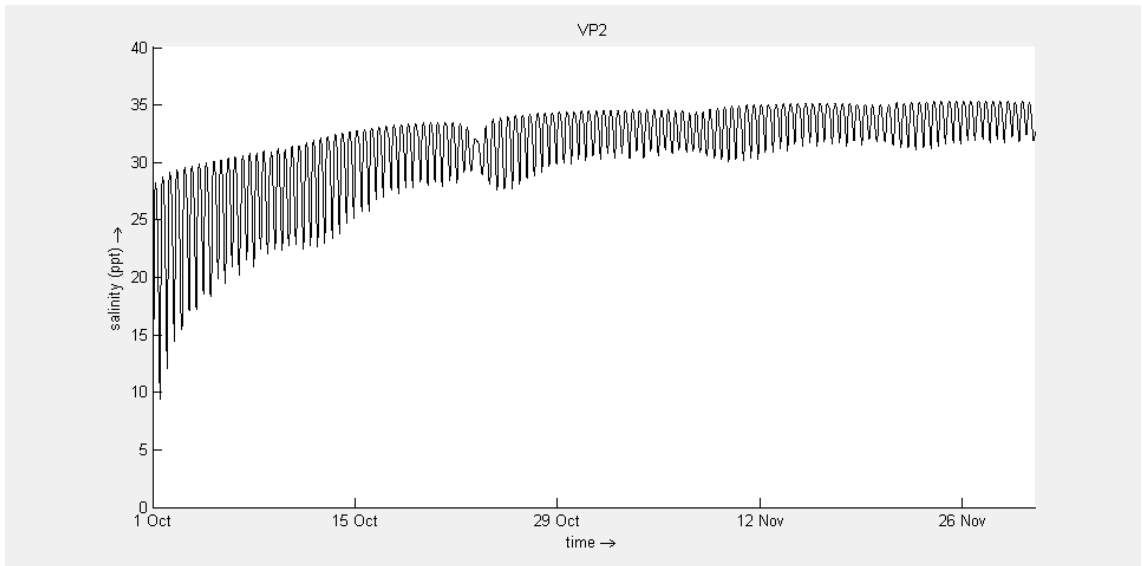


Figura B44. Resultados do cenário C5b (NMM = 0.77 m, Caudal = 10 m³/s) no ponto VP2.

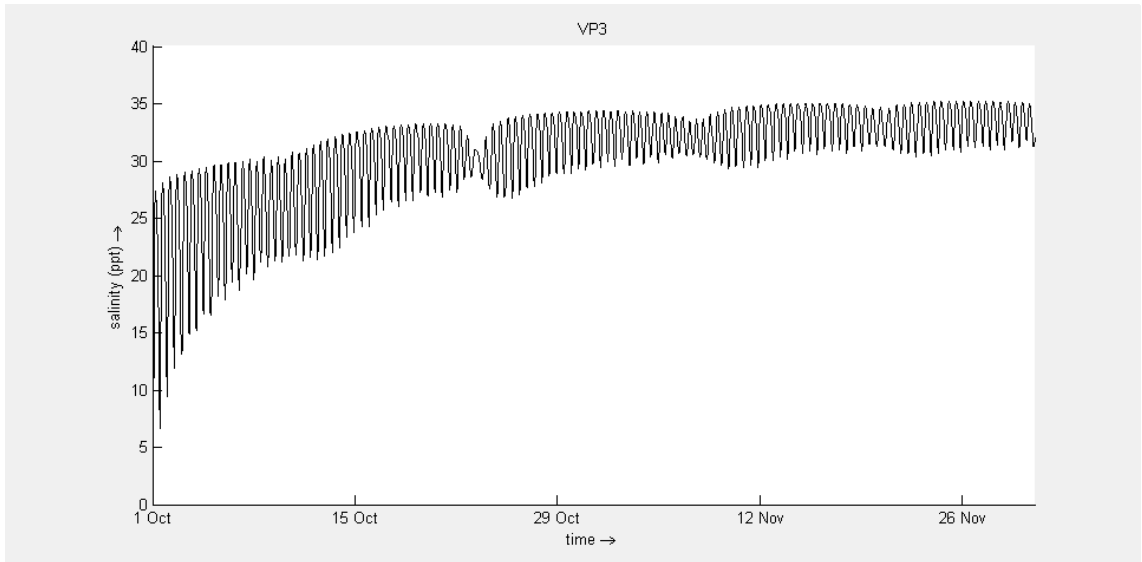


Figura B45. Resultados do cenário C5b (NMM = 0.77 m, Caudal = 10 m³/s) no ponto VP3.

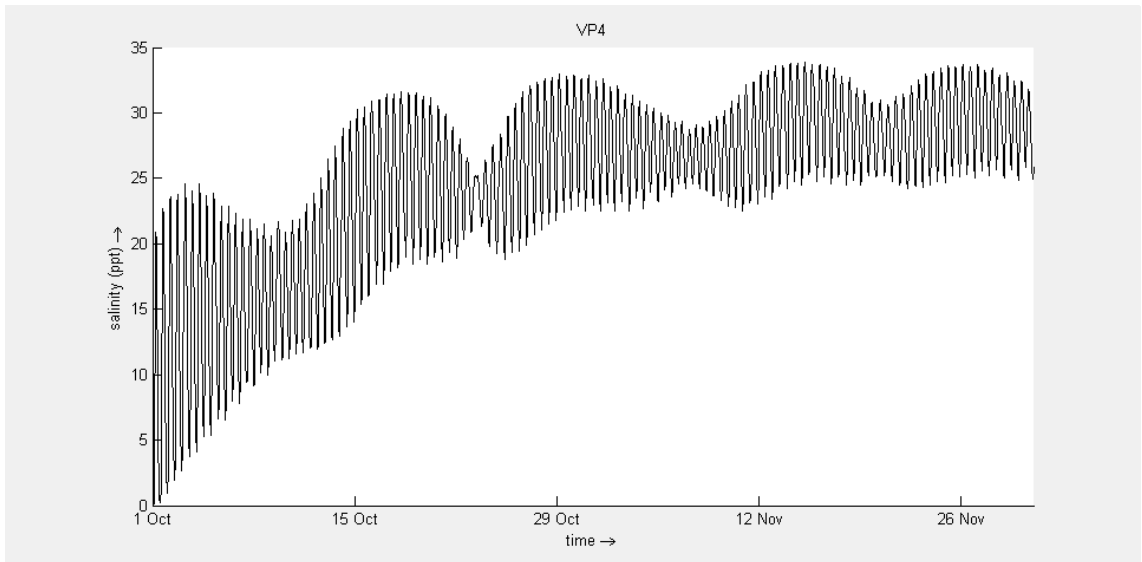


Figura B46. Resultados do cenário C5b (NMM = 0.77 m, Caudal = 10 m³/s) no ponto VP4.

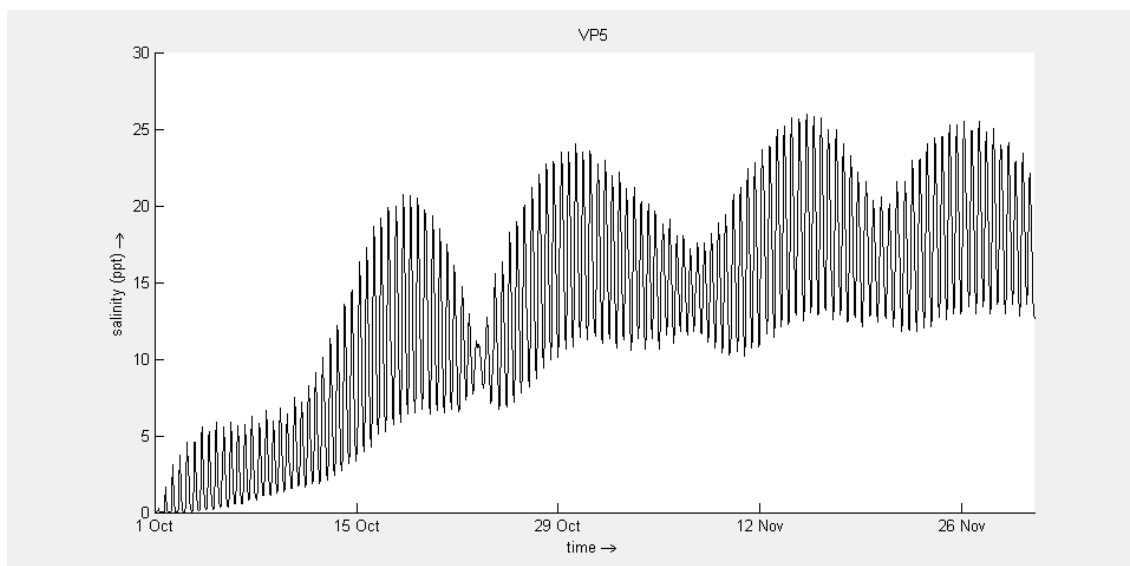


Figura B47. Resultados do cenário C5b (NMM = 0.77 m, Caudal = 10 m³/s) no ponto VP5.

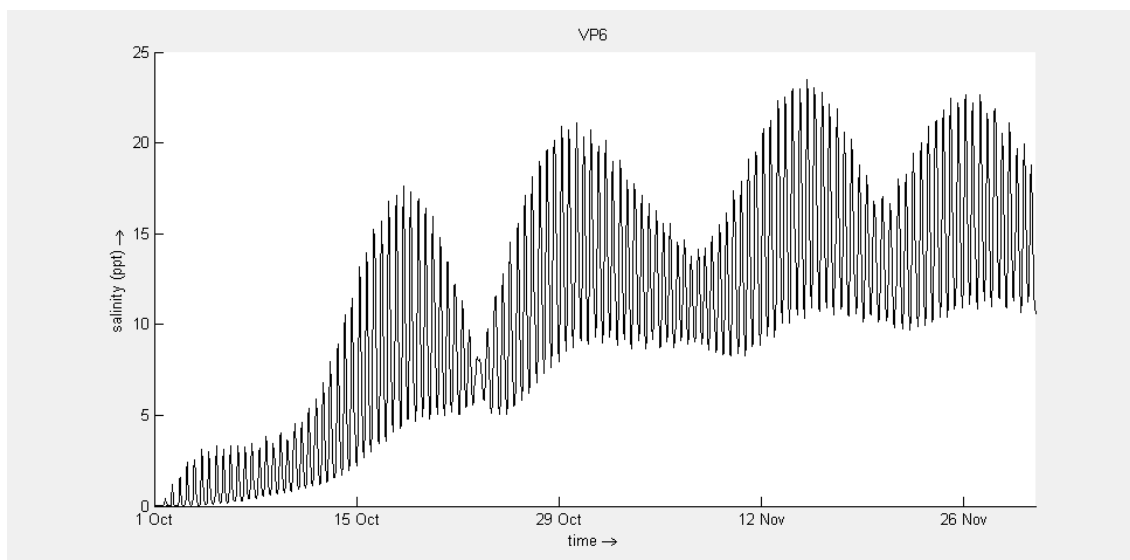


Figura B48. Resultados do cenário C5b (NMM = 0.77 m, Caudal = 10 m³/s) no ponto VP6.

As quatro figuras a seguir apresentam os resultados dos cenários com caudal alto, sendo que nesses não houve intrusão salina. Por esse motivo, serão apresentadas figuras apenas relativas ao ponto VP1, sendo esse o mais próximo da foz.

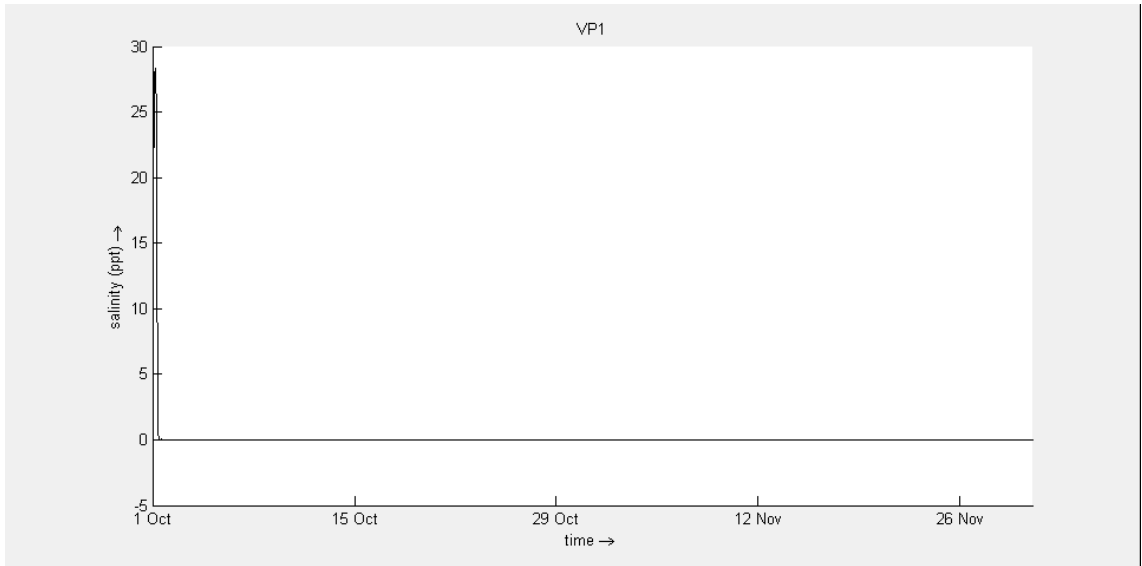


Figura B49. Resultados do cenário C6a (NMM = 0.21 m, Caudal = 6037.7 m³/s) no ponto VP1.

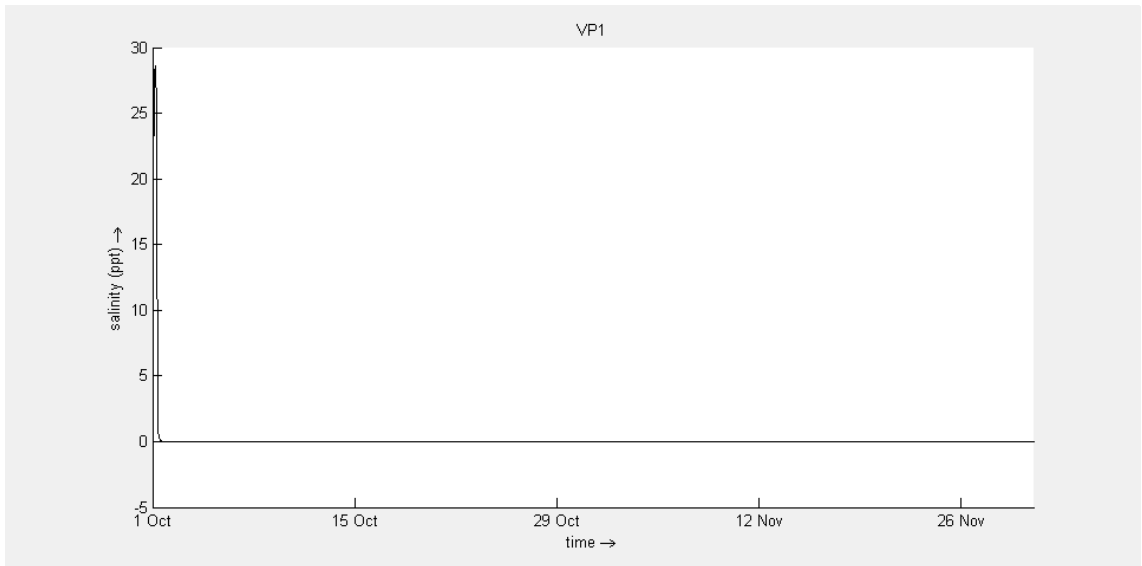


Figura B50. Resultados do cenário C6b (NMM = 0.53 m, Caudal = 6037.7 m³/s) no ponto VP1.

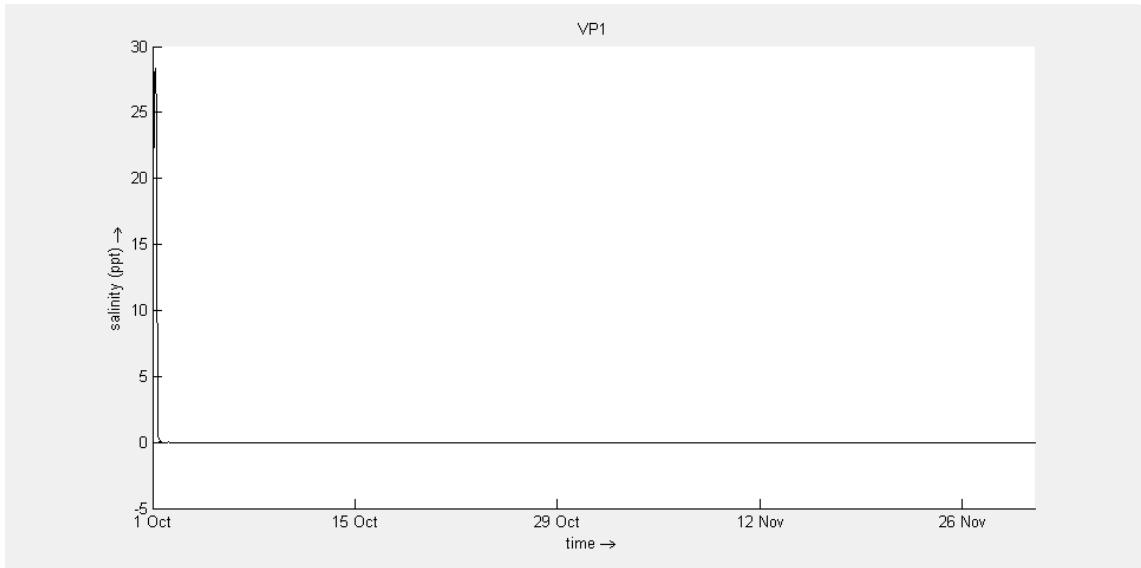


Figura B51. Resultados do cenário C7a (NMM = 0.24 m, Caudal = 6037.7 m³/s) no ponto VP1.

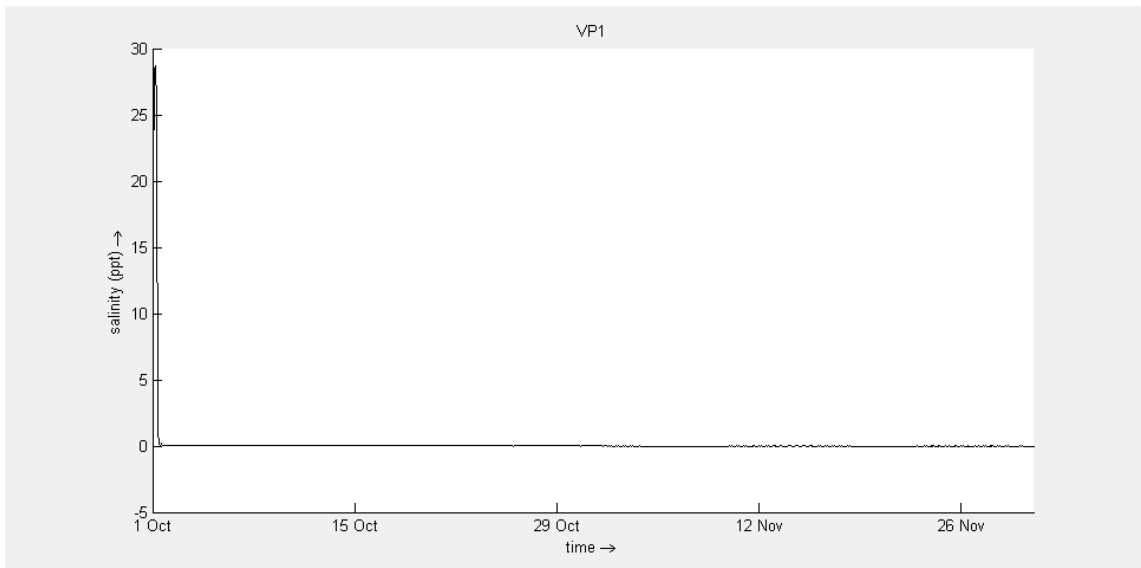


Figura B52. Resultados do cenário C7b (NMM = 0.77 m, Caudal = 6037.7 m³/s) no ponto VP1.

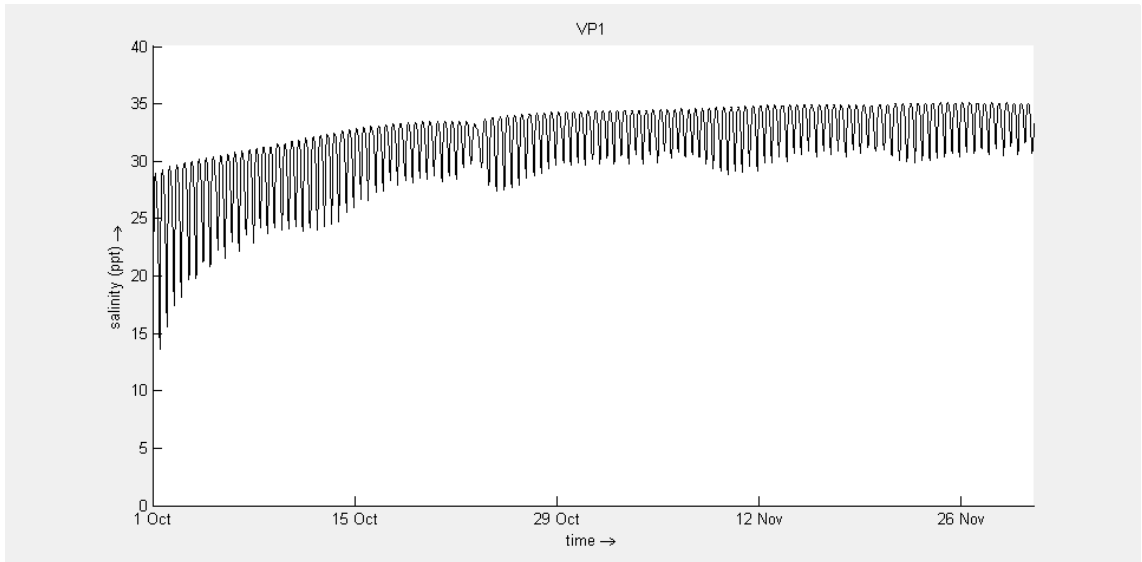


Figura B53. Resultados do cenário C8-20 (NMM = 0.77 m, Caudal = 20 m³/s) no ponto VP1.

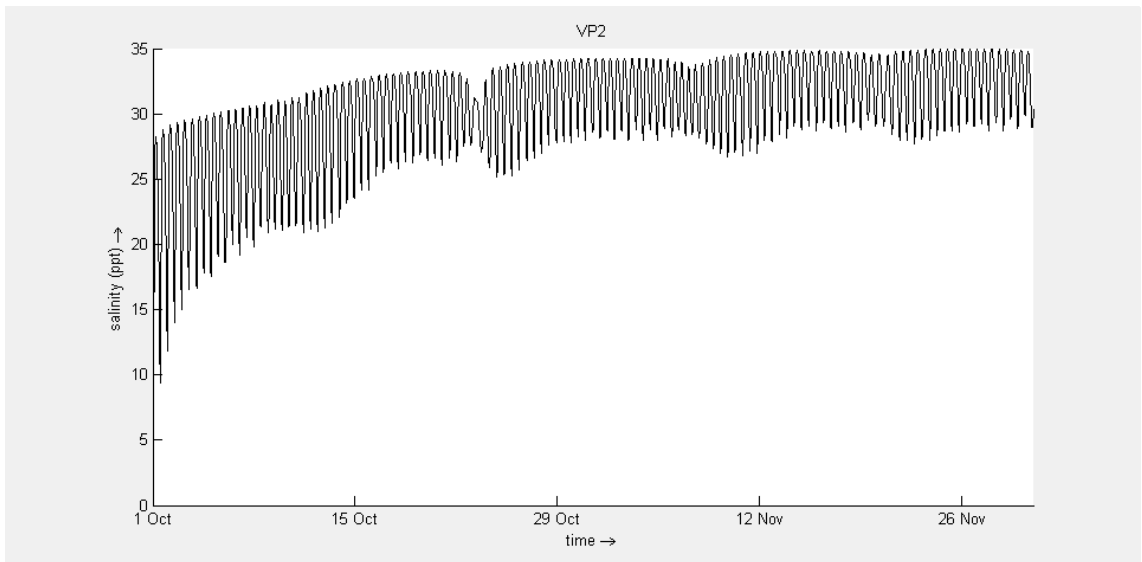


Figura B54. Resultados do cenário C8-20 (NMM = 0.77 m, Caudal = 20 m³/s) no ponto VP2.

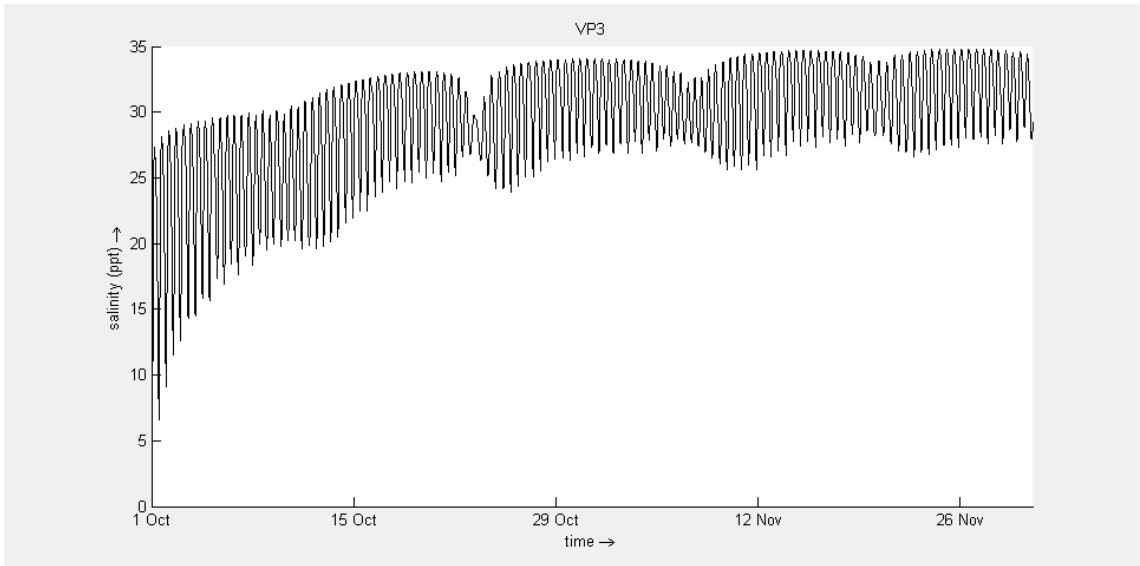


Figura B55. Resultados do cenário C8-20 (NMM = 0.77 m, Caudal = 20 m³/s) no ponto VP3.

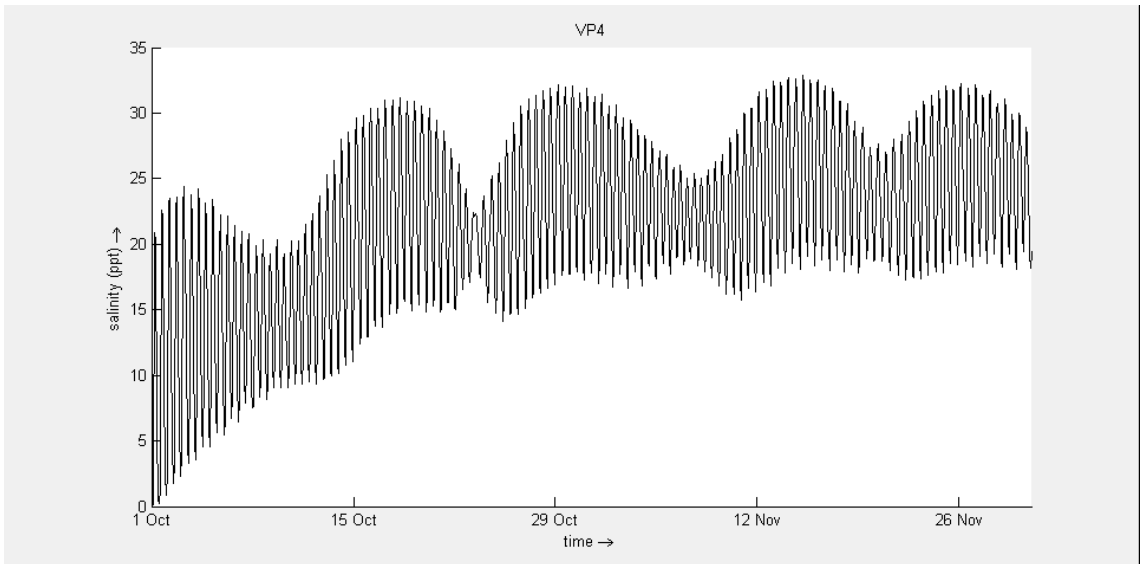


Figura B56. Resultados do cenário C8-20 (NMM = 0.77 m, Caudal = 20 m³/s) no ponto VP4.

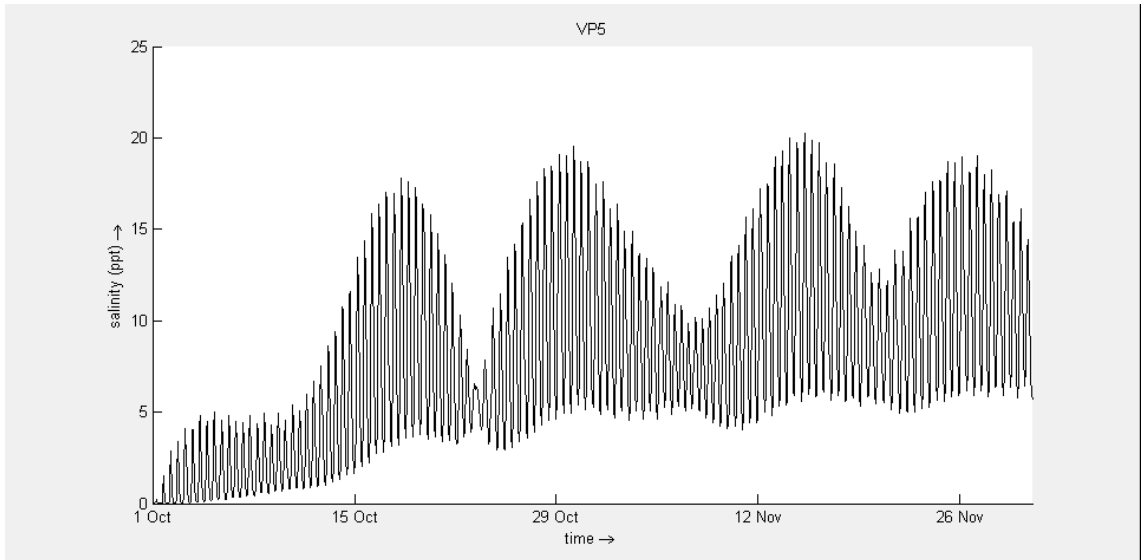


Figura B57. Resultados do cenário C8-20 (NMM = 0.77 m, Caudal = 20 m³/s) no ponto VP5.

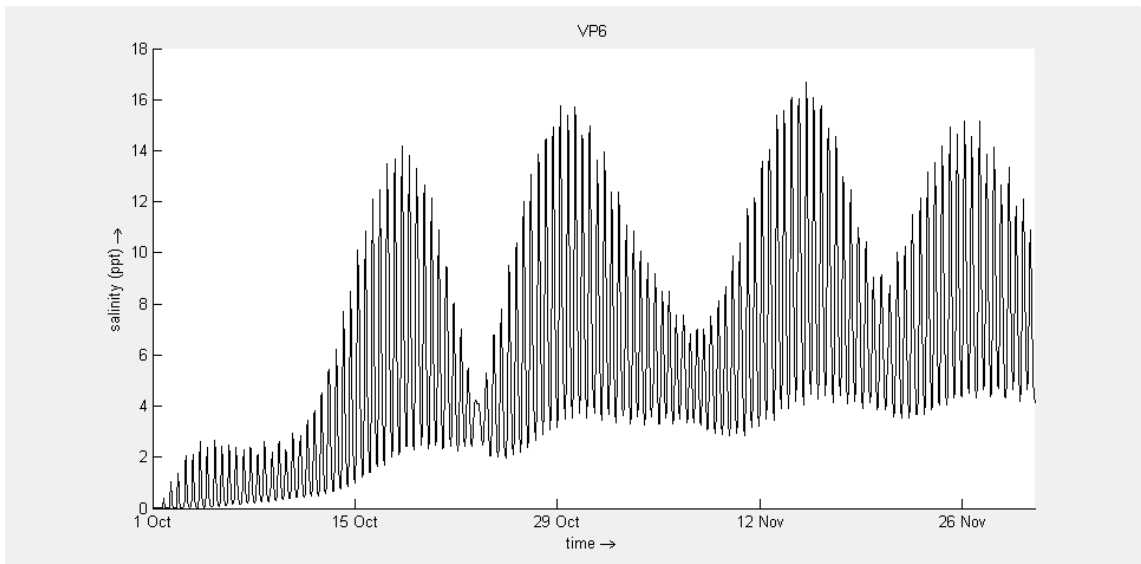


Figura B58. Resultados do cenário C8-20 (NMM = 0.77 m, Caudal = 20 m³/s) no ponto VP6.

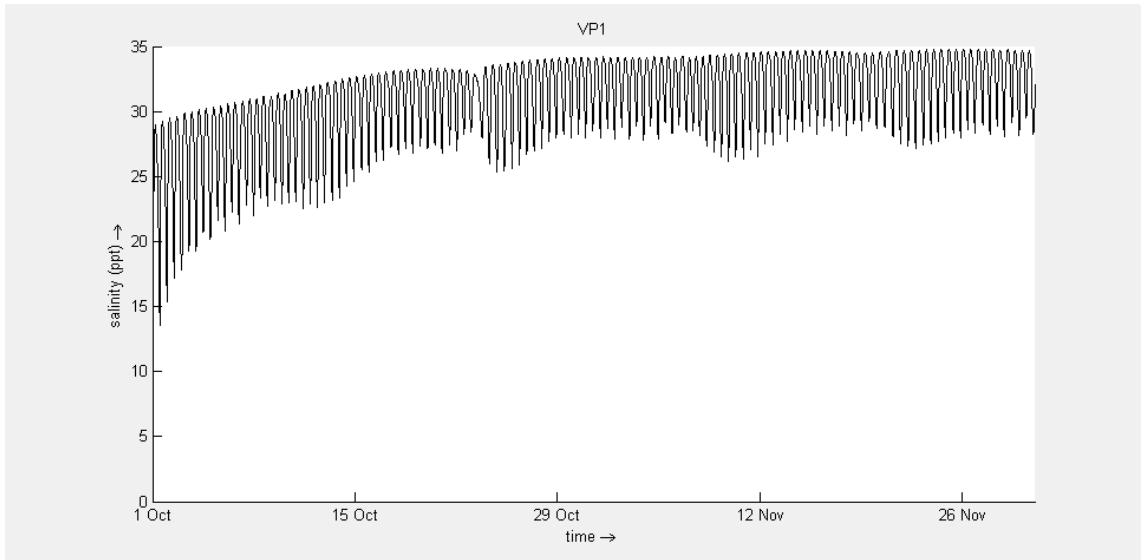


Figura B59. Resultados do cenário C8-30 (NMM = 0.77 m, Caudal = 30 m³/s) no ponto VP1.

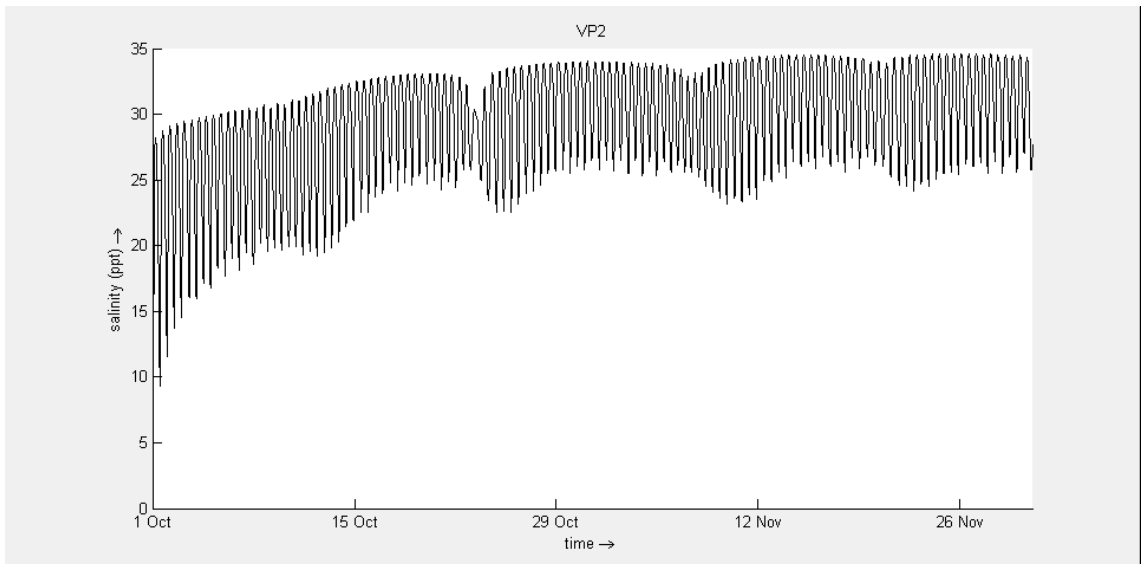


Figura B60. Resultados do cenário C8-30 (NMM = 0.77 m, Caudal = 30 m³/s) no ponto VP2.

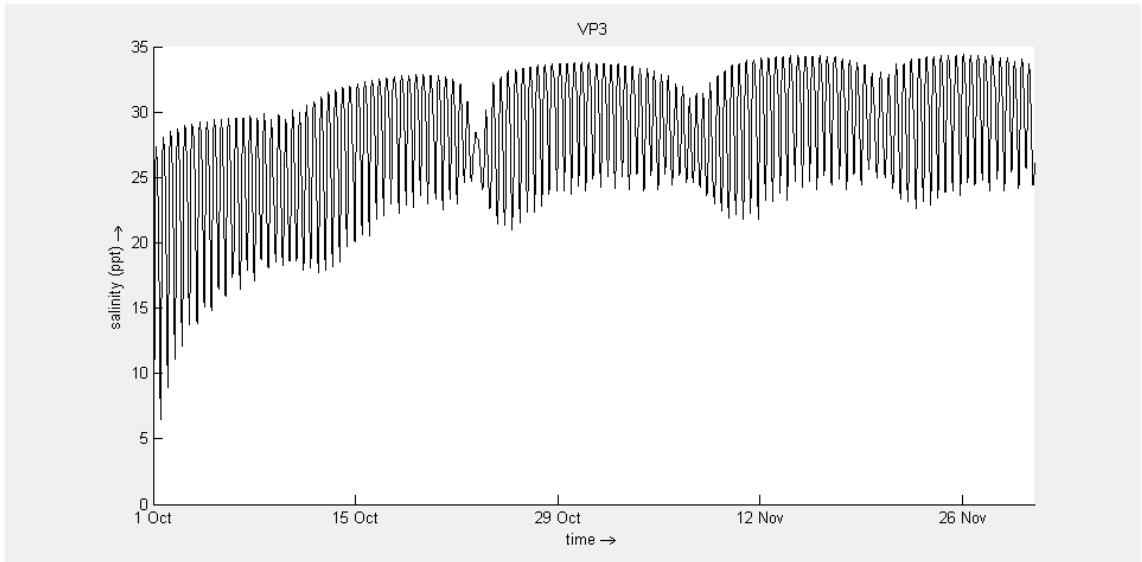


Figura B61. Resultados do cenário C8-30 (NMM = 0.77 m, Caudal = 30 m³/s) no ponto VP3.

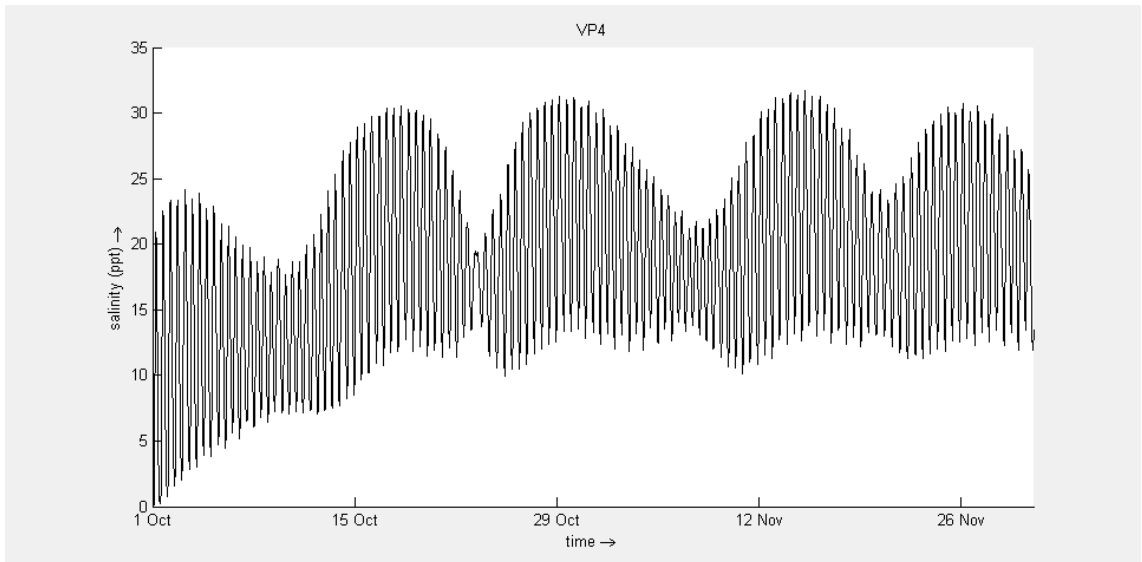


Figura B62. Resultados do cenário C8-30 (NMM = 0.77 m, Caudal = 30 m³/s) no ponto VP4.

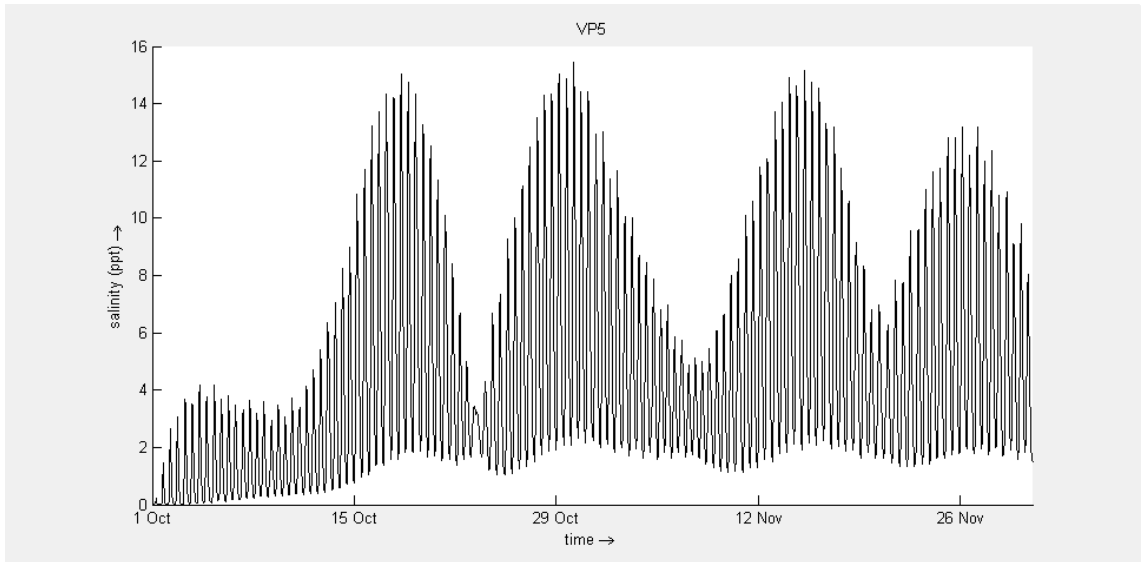


Figura B63. Resultados do cenário C8-30 (NMM = 0.77 m, Caudal = 30 m³/s) no ponto VP5.

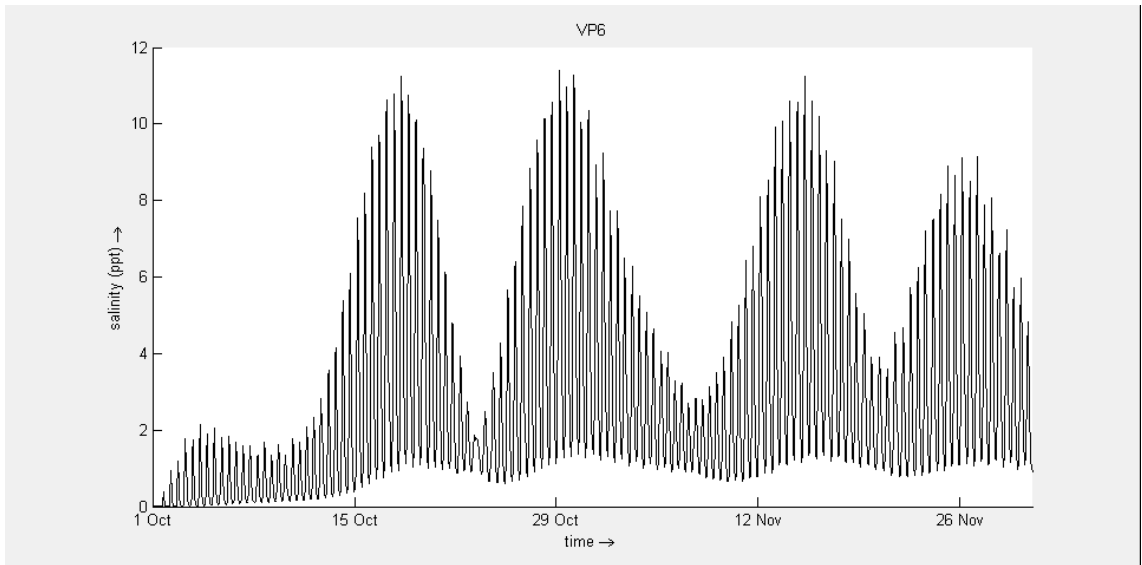


Figura B64. Resultados do cenário C8-30 (NMM = 0.77 m, Caudal = 30 m³/s) no ponto VP6.

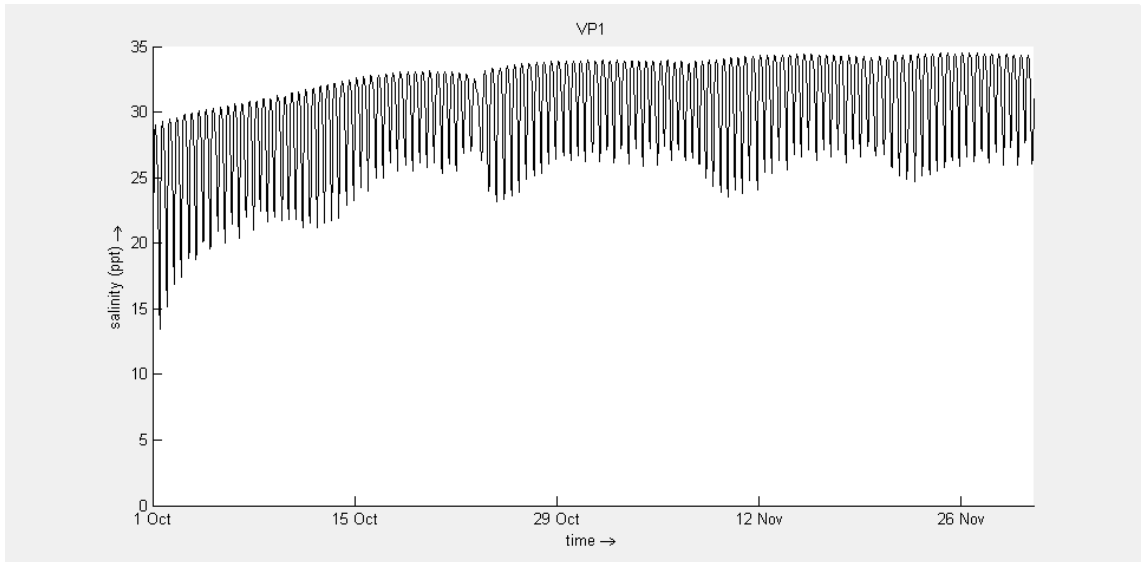


Figura B65. Resultados do cenário C8-40 (NMM = 0.77 m, Caudal = 40 m³/s) no ponto VP1.

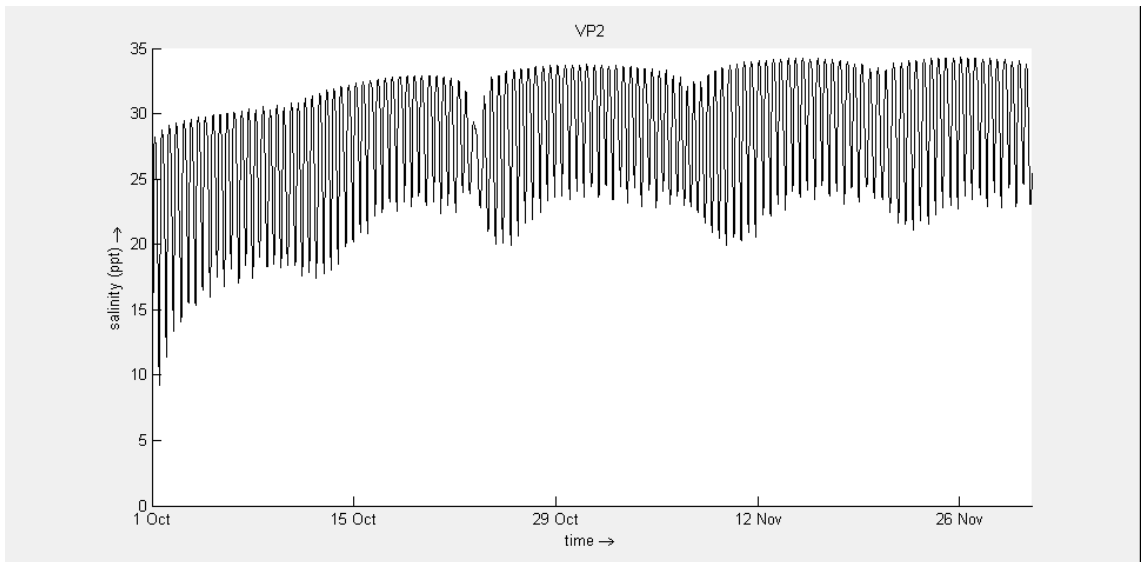


Figura B66. Resultados do cenário C8-40 (NMM = 0.77 m, Caudal = 40 m³/s) no ponto VP2.

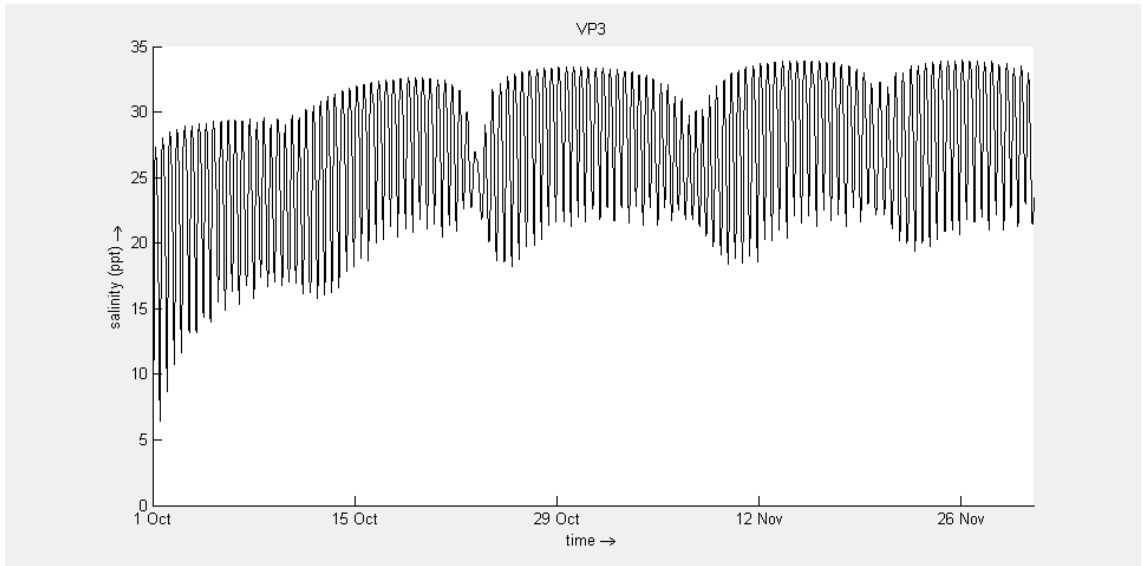


Figura B67. Resultados do cenário C8-40 (NMM = 0.77 m, Caudal = 40 m³/s) no ponto VP3.

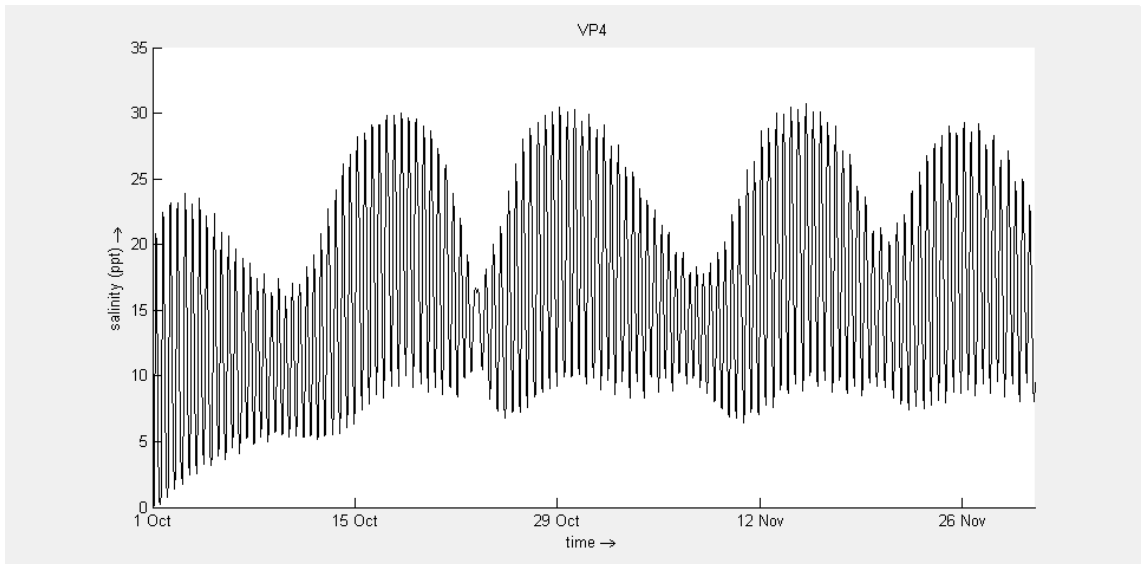


Figura B68. Resultados do cenário C8-40 (NMM = 0.77 m, Caudal = 40 m³/s) no ponto VP4.

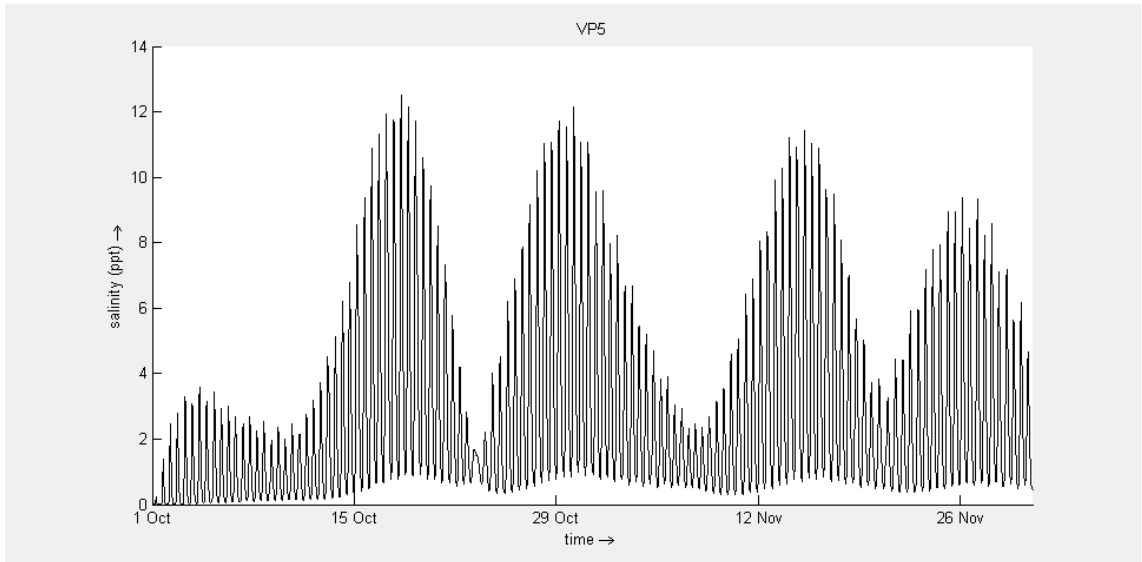


Figura B69. Resultados do cenário C8-40 (NMM = 0.77 m, Caudal = 40 m³/s) no ponto VP5.

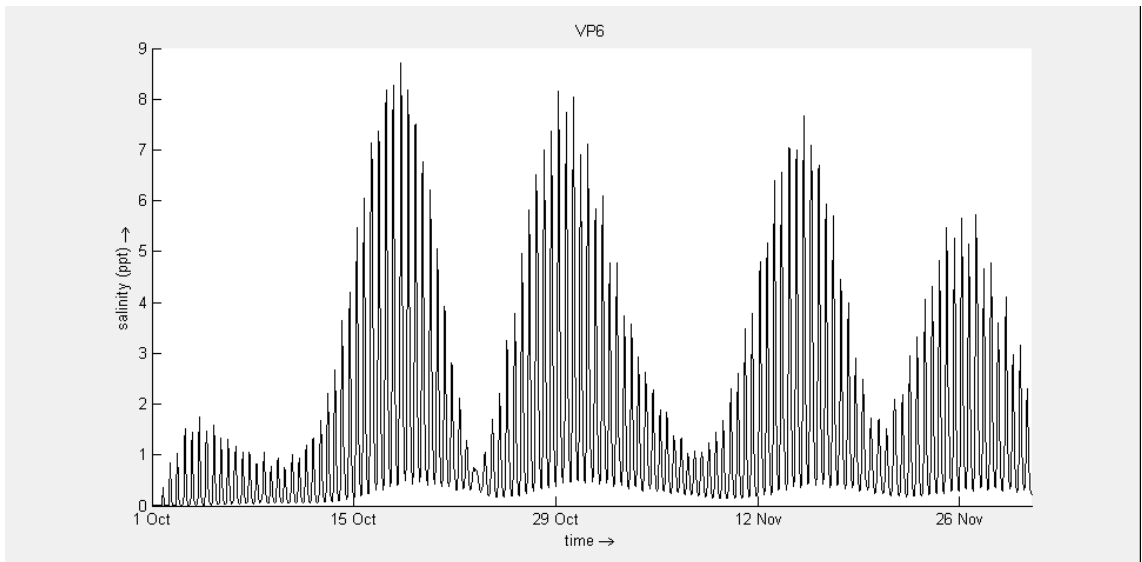


Figura B70. Resultados do cenário C8-40 (NMM = 0.77 m, Caudal = 40 m³/s) no ponto VP6.

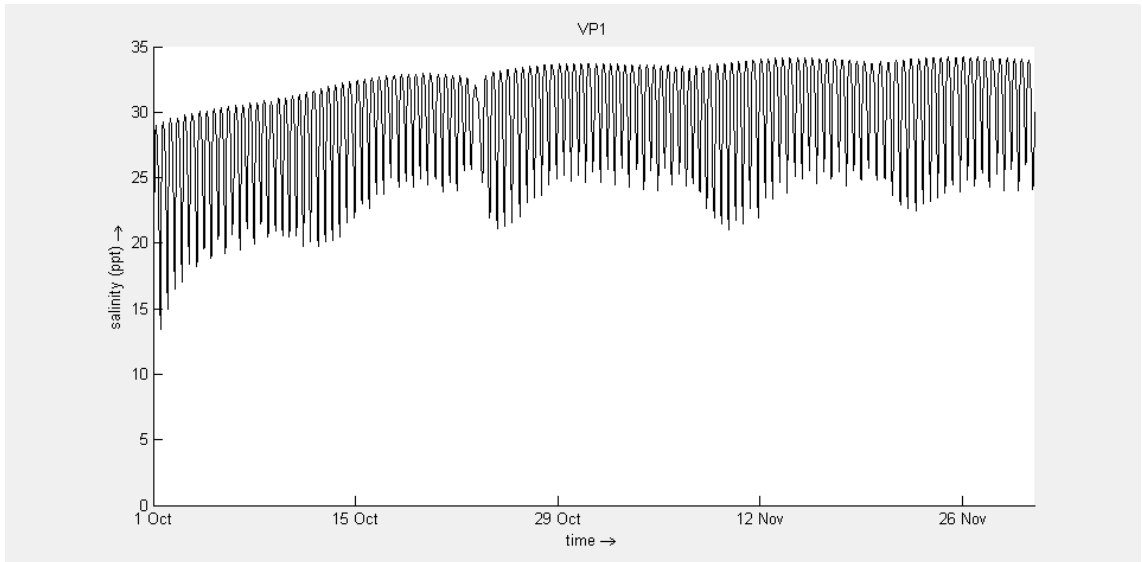


Figura B71. Resultados do cenário C8-50 (NMM = 0.77 m, Caudal = 50 m³/s) no ponto VP1.

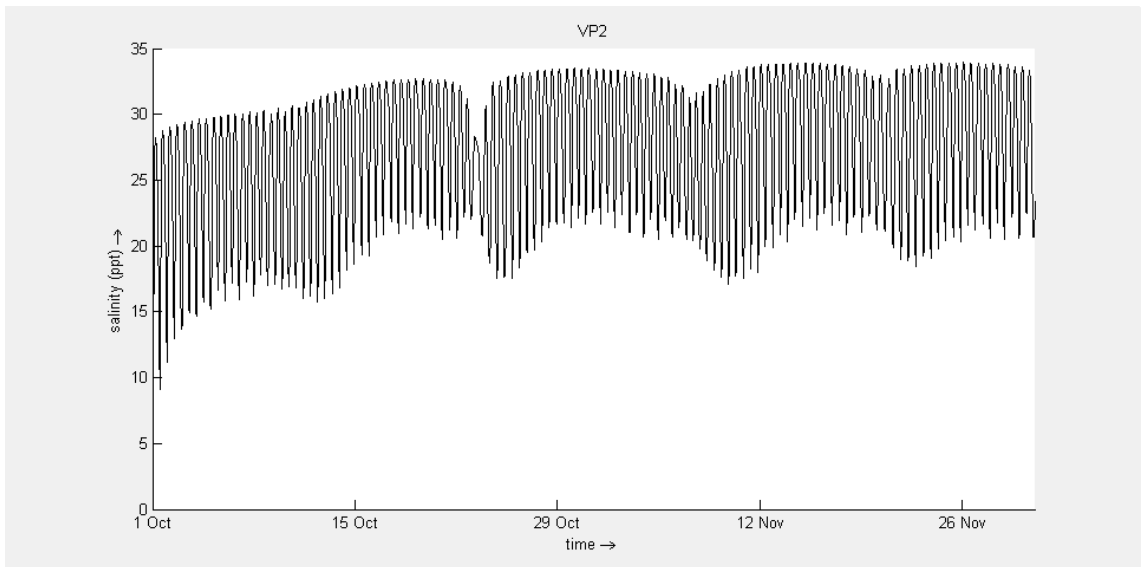


Figura B72. Resultados do cenário C8-50 (NMM = 0.77 m, Caudal = 50 m³/s) no ponto VP2.

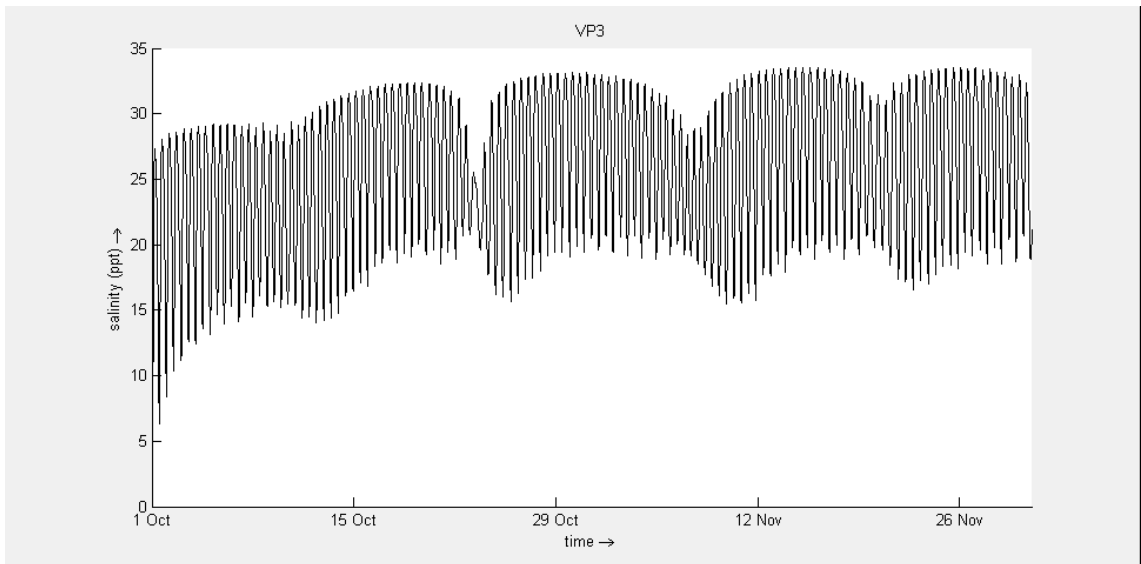


Figura B73. Resultados do cenário C8-50 (NMM = 0.77 m, Caudal = 50 m³/s) no ponto VP3.

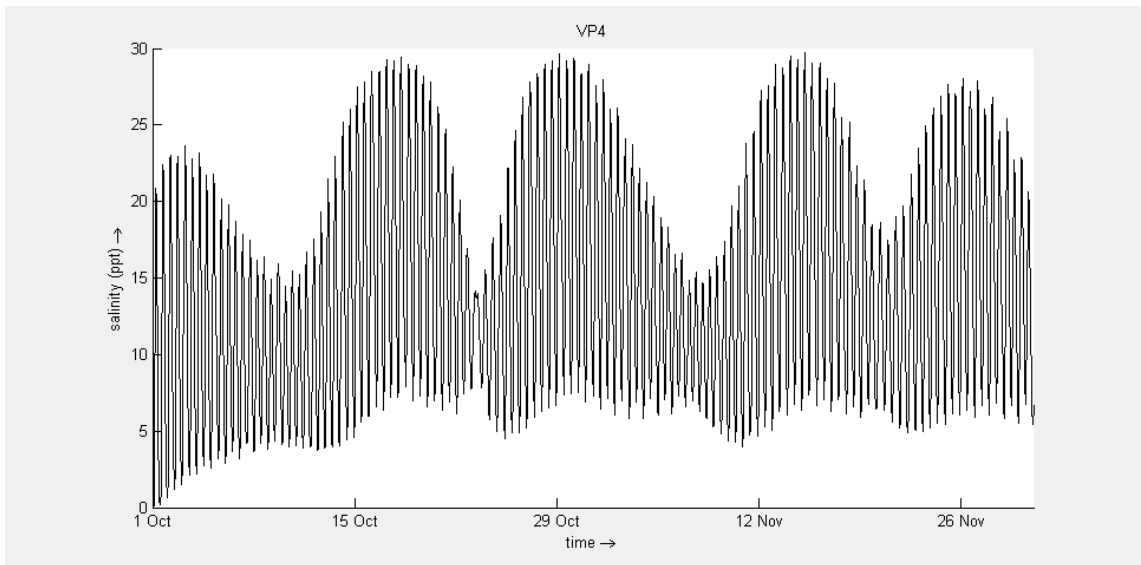


Figura B74. Resultados do cenário C8-50 (NMM = 0.77 m, Caudal = 50 m³/s) no ponto VP4.

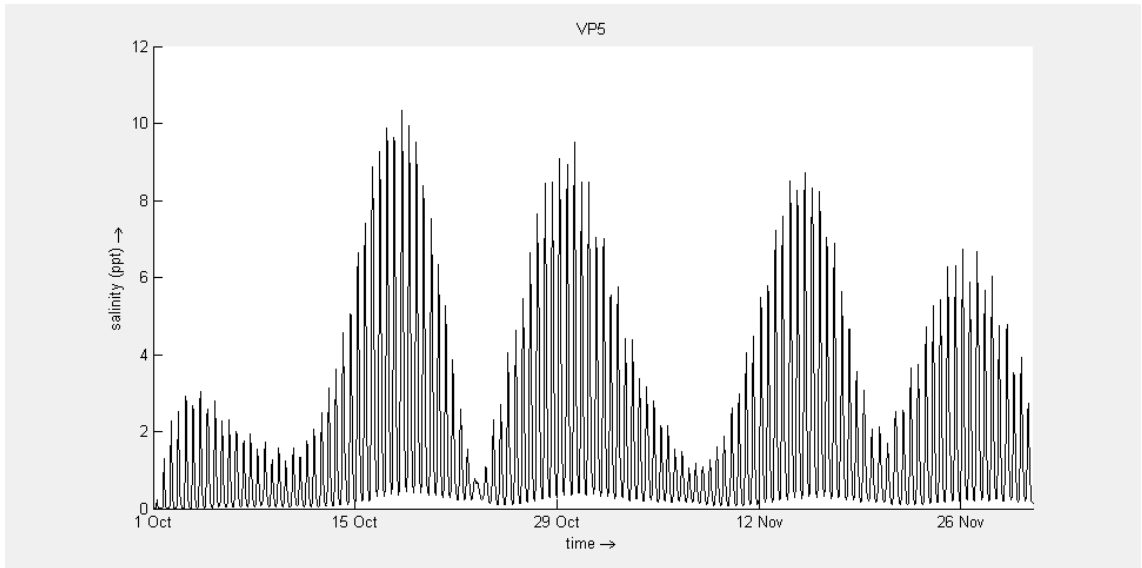


Figura B75. Resultados do cenário C8-50 (NMM = 0.77 m, Caudal = 50 m³/s) no ponto VP5.

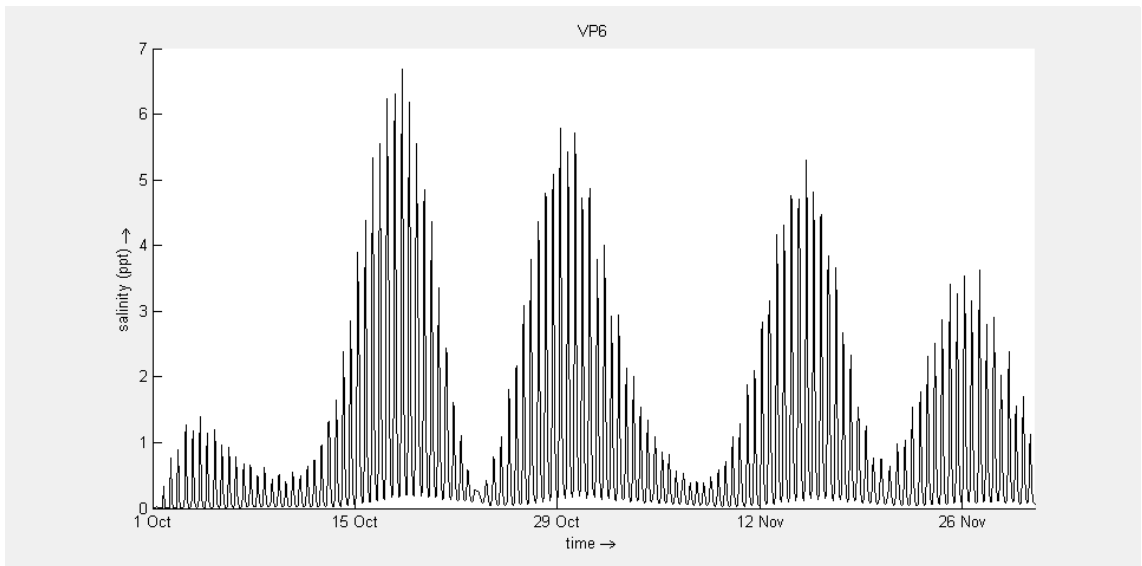


Figura B76. Resultados do cenário C8-50 (NMM = 0.77 m, Caudal = 50 m³/s) no ponto VP6.

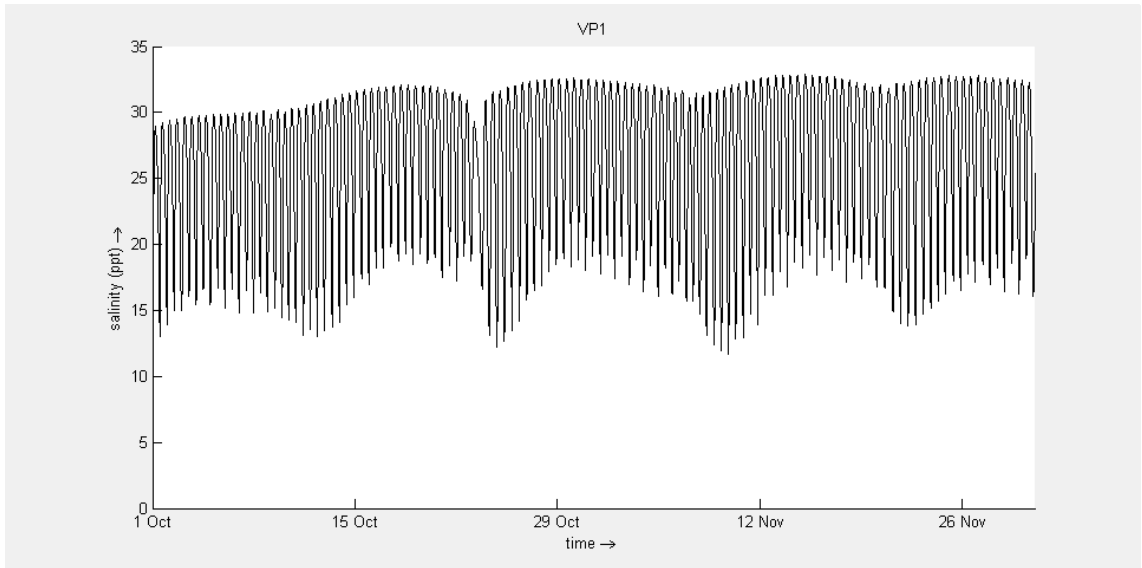


Figura B77. Resultados do cenário C8-100 (NMM = 0.77 m, Caudal = 100 m³/s) no ponto VP1.

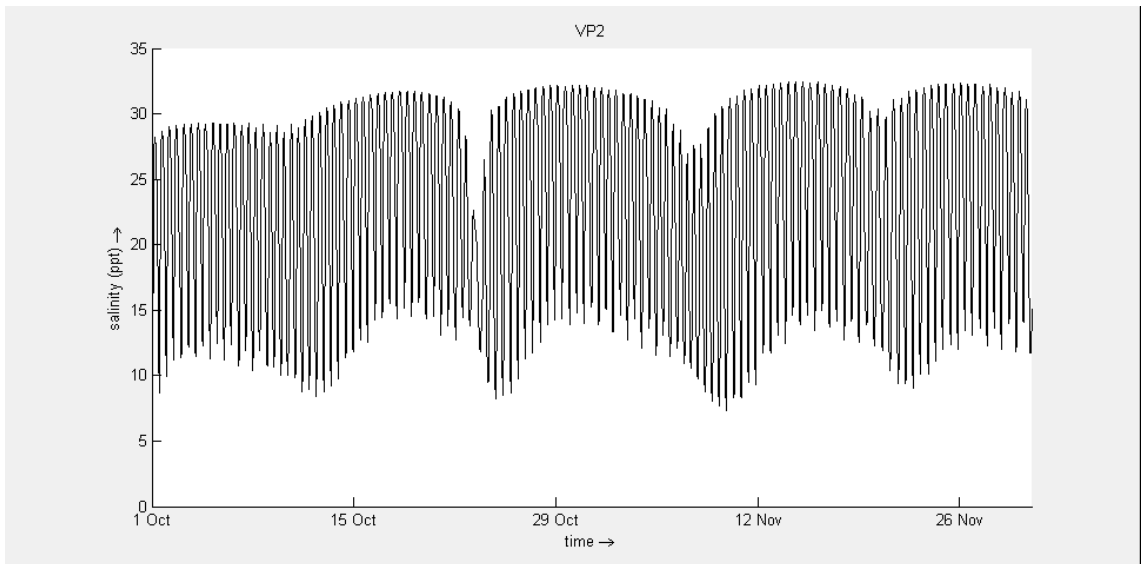


Figura B78. Resultados do cenário C8-100 (NMM = 0.77 m, Caudal = 100 m³/s) no ponto VP2.

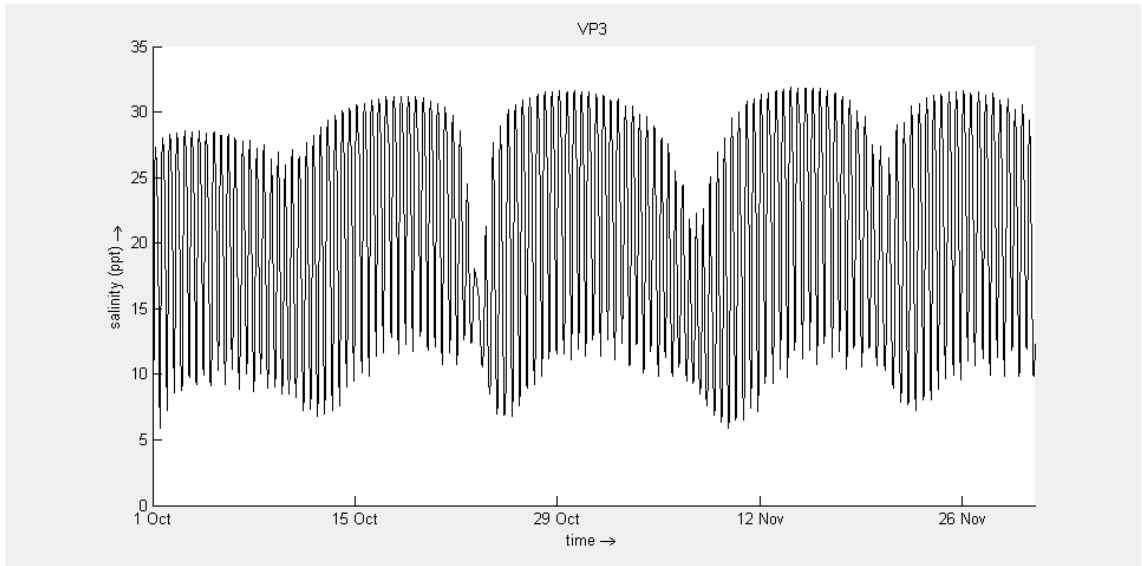


Figura B79. Resultados do cenário C8-100 (NMM = 0.77 m, Caudal = 100 m³/s) no ponto VP3.

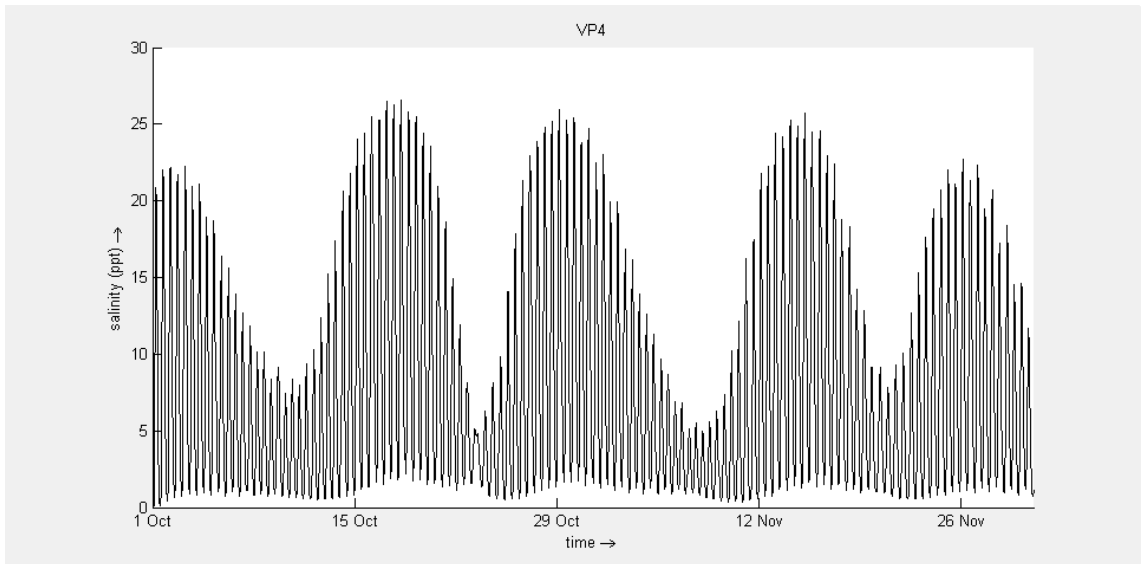


Figura B80. Resultados do cenário C8-100 (NMM = 0.77 m, Caudal = 100 m³/s) no ponto VP4.

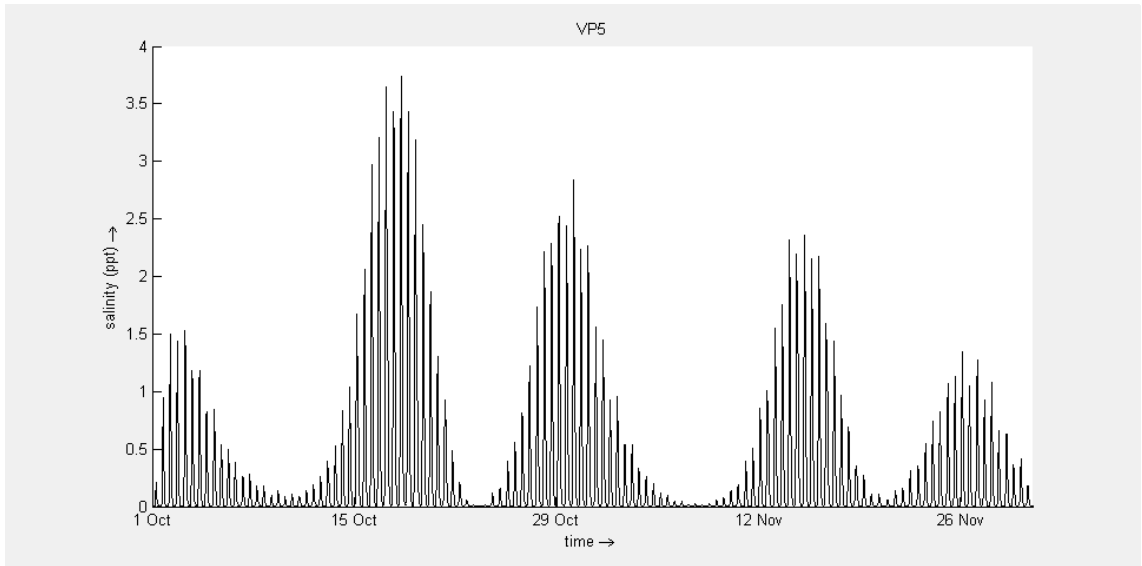


Figura B81. Resultados do cenário C8-100 (NMM = 0.77 m, Caudal = 100 m³/s) no ponto VP5.

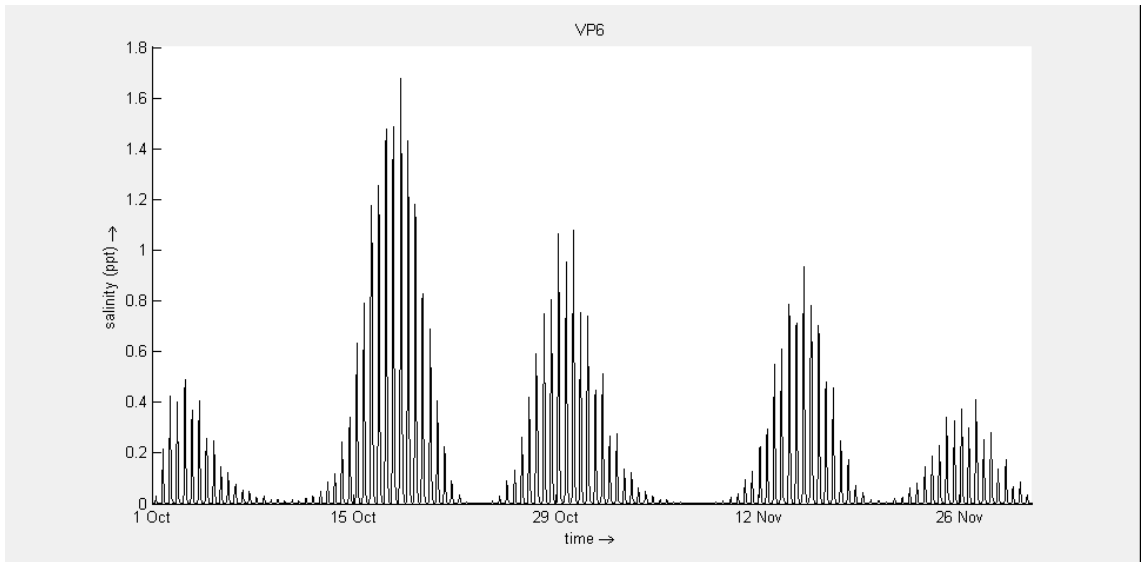


Figura B82. Resultados do cenário C8-100 (NMM = 0.77 m, Caudal = 100 m³/s) no ponto VP6.

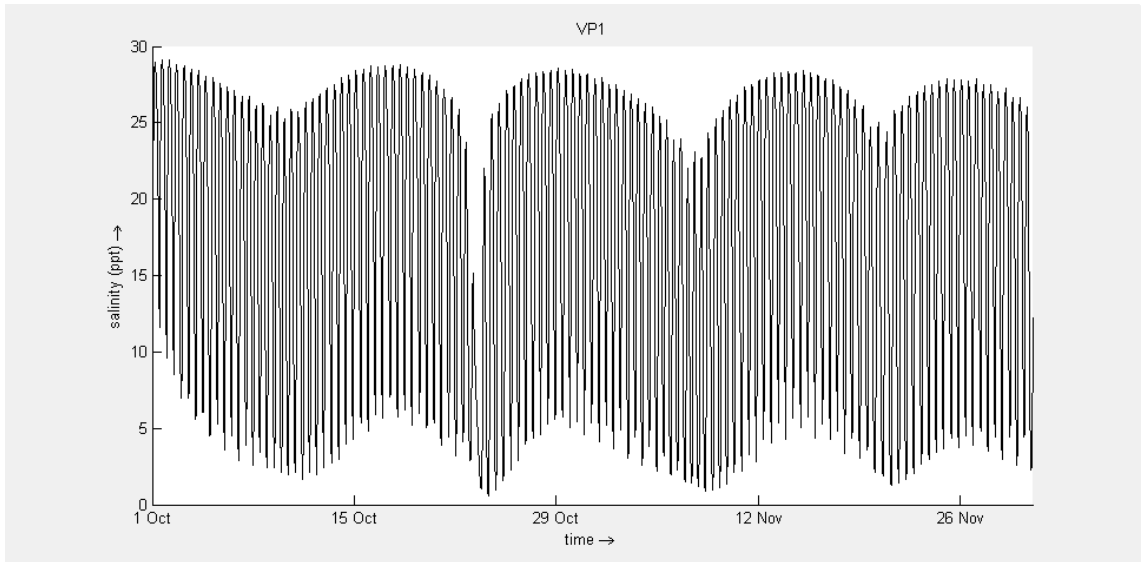


Figura B83. Resultados do cenário C8-300 (NMM = 0.77 m, Caudal = 300 m³/s) no ponto VP1.

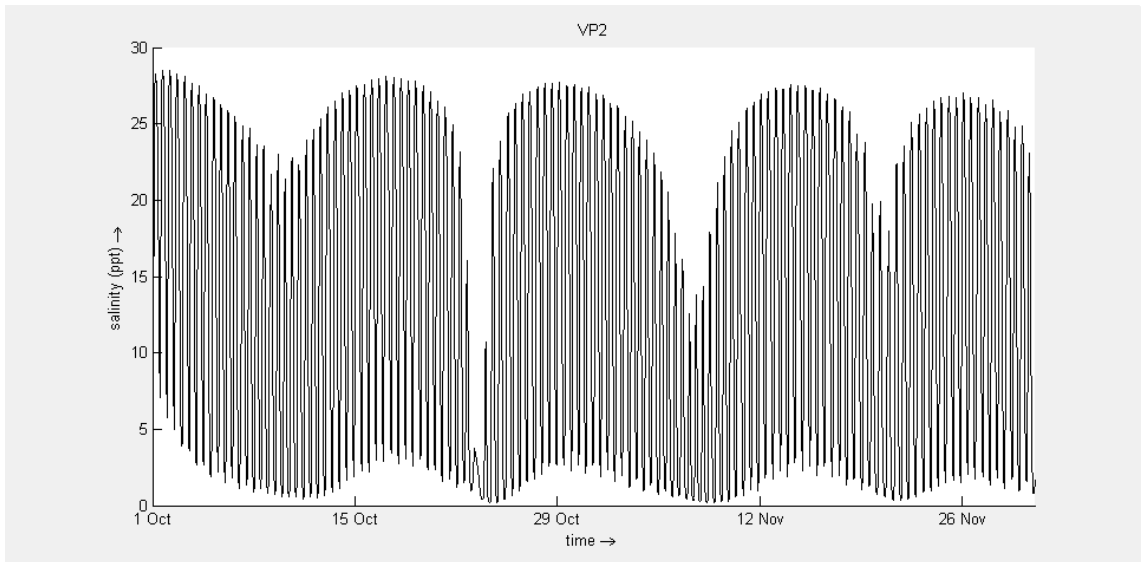


Figura B84. Resultados do cenário C8-300 (NMM = 0.77 m, Caudal = 300 m³/s) no ponto VP2.

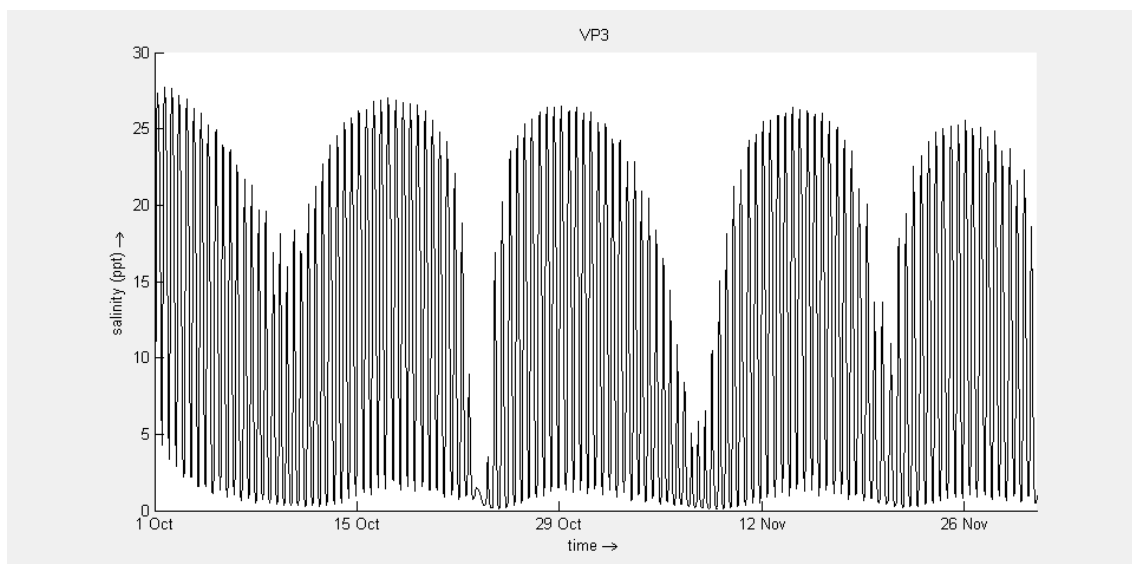


Figura B85. Resultados do cenário C8-300 (NMM = 0.77 m, Caudal = 300 m³/s) no ponto VP3.

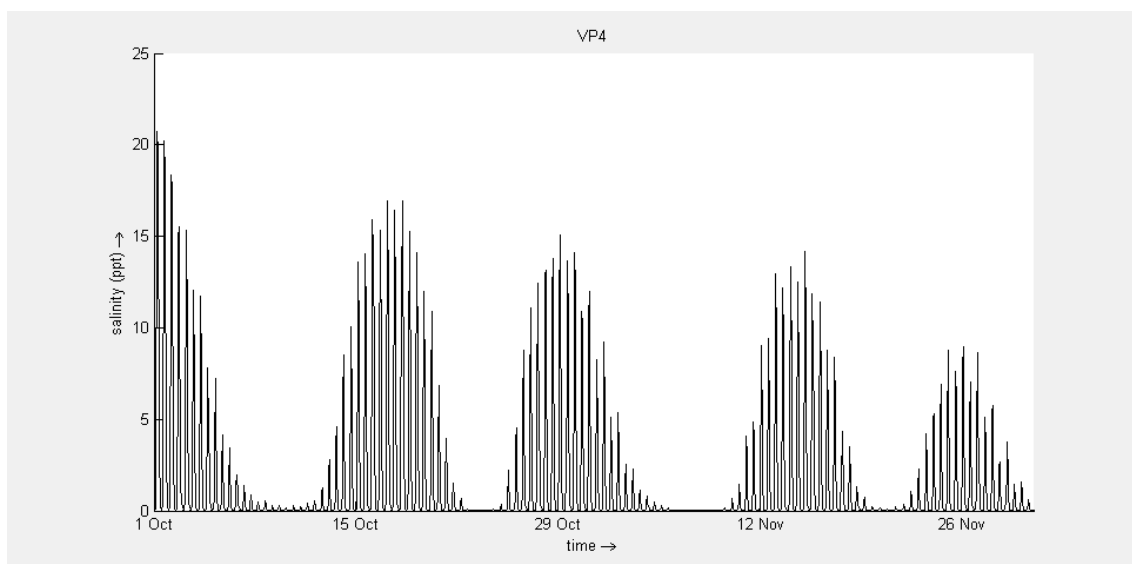


Figura B86. Resultados do cenário C8-300 (NMM = 0.77 m, Caudal = 300 m³/s) no ponto VP4.

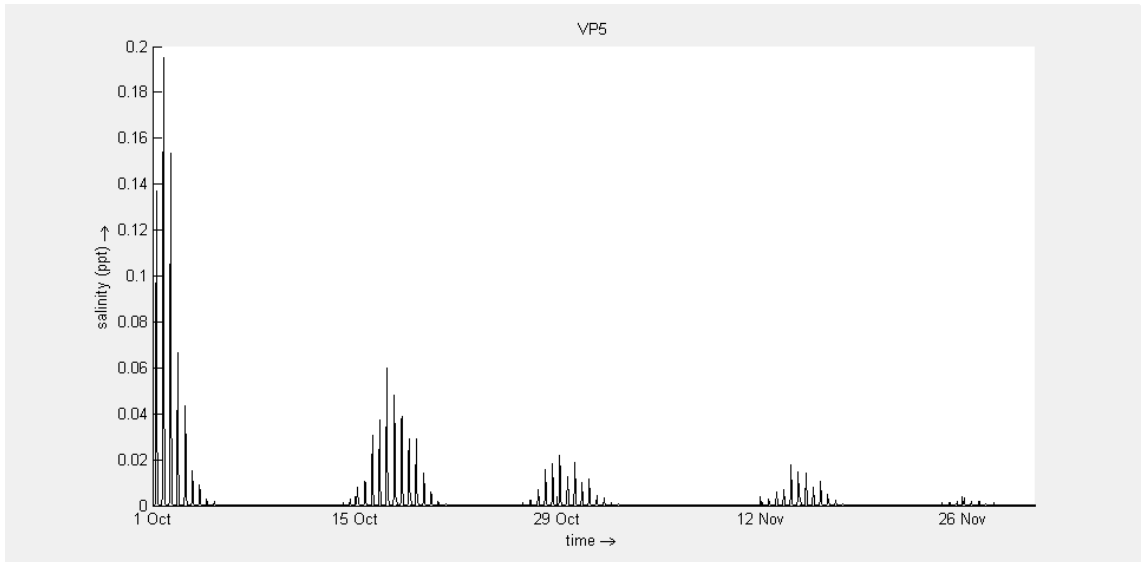


Figura B87. Resultados do cenário C8-300 (NMM = 0.77 m, Caudal = 300 m³/s) no ponto VP5.

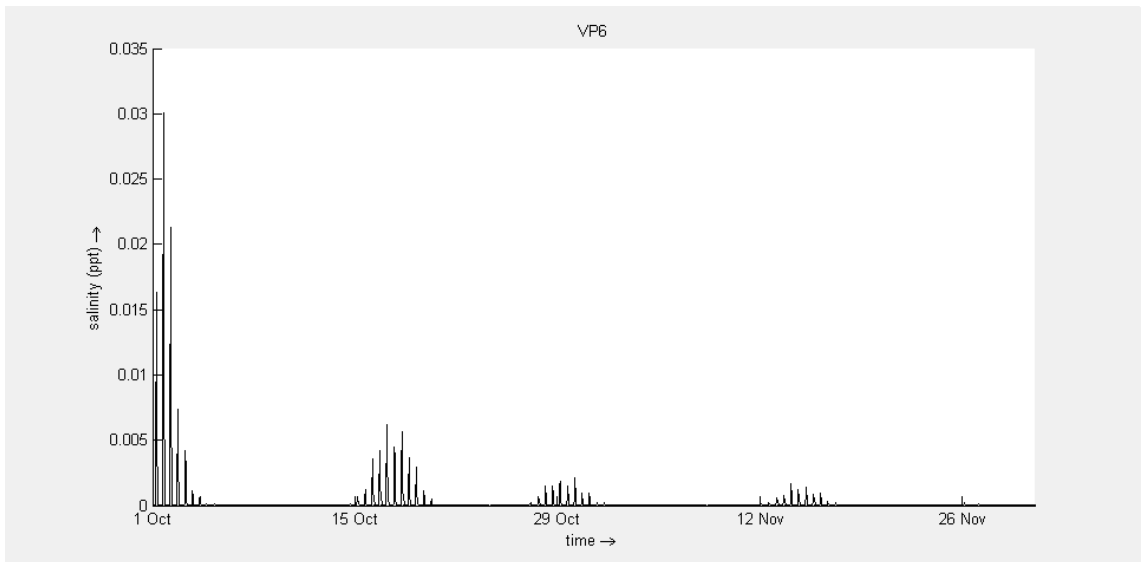


Figura B88. Resultados do cenário C8-300 (NMM = 0.77 m, Caudal = 300 m³/s) no ponto VP6.

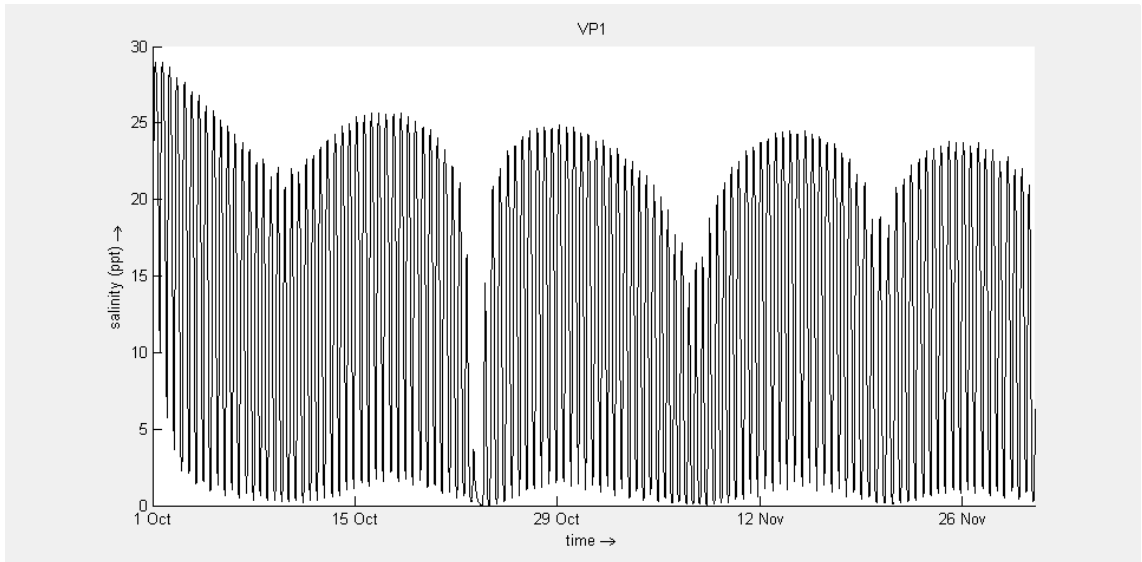


Figura B89. Resultados do cenário C8-500 (NMM = 0.77 m, Caudal = 500 m³/s) no ponto VP1.

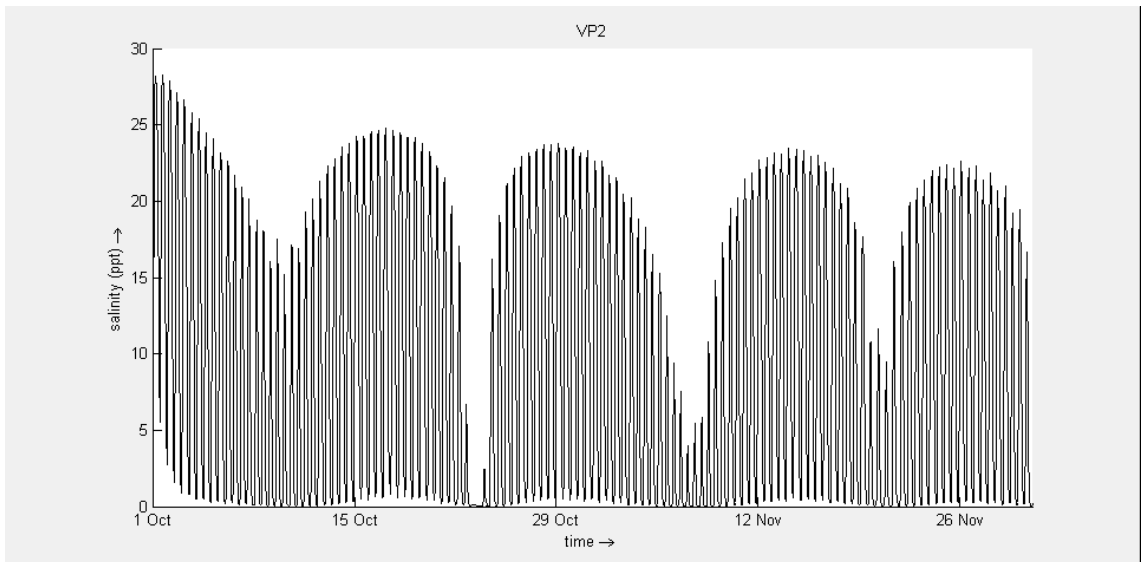


Figura B90. Resultados do cenário C8-500 (NMM = 0.77 m, Caudal = 500 m³/s) no ponto VP2.

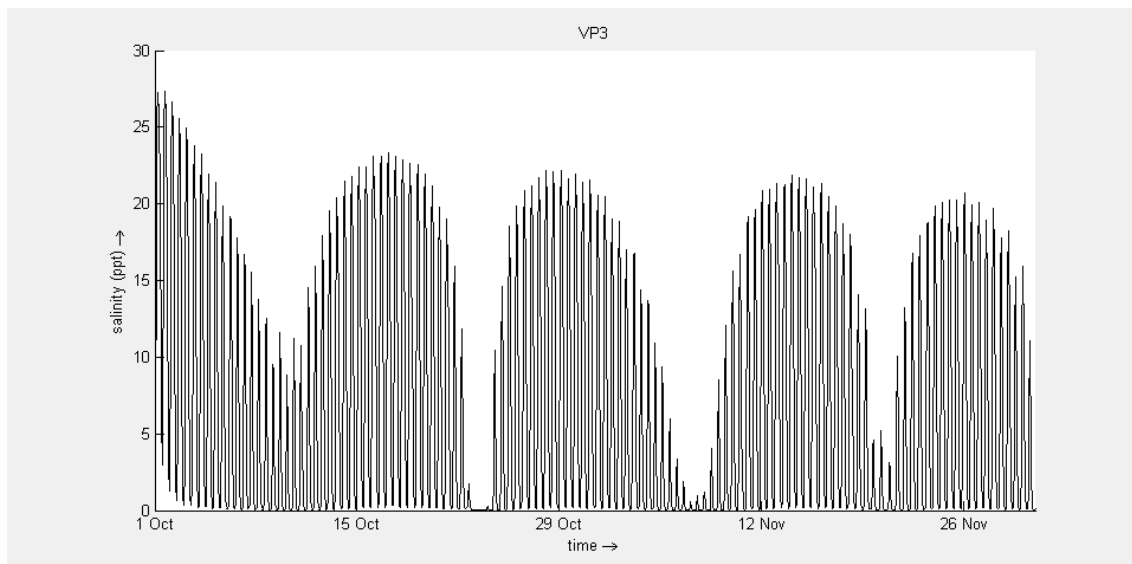


Figura B91. Resultados do cenário C8-500 (NMM = 0.77 m, Caudal = 500 m³/s) no ponto VP3.

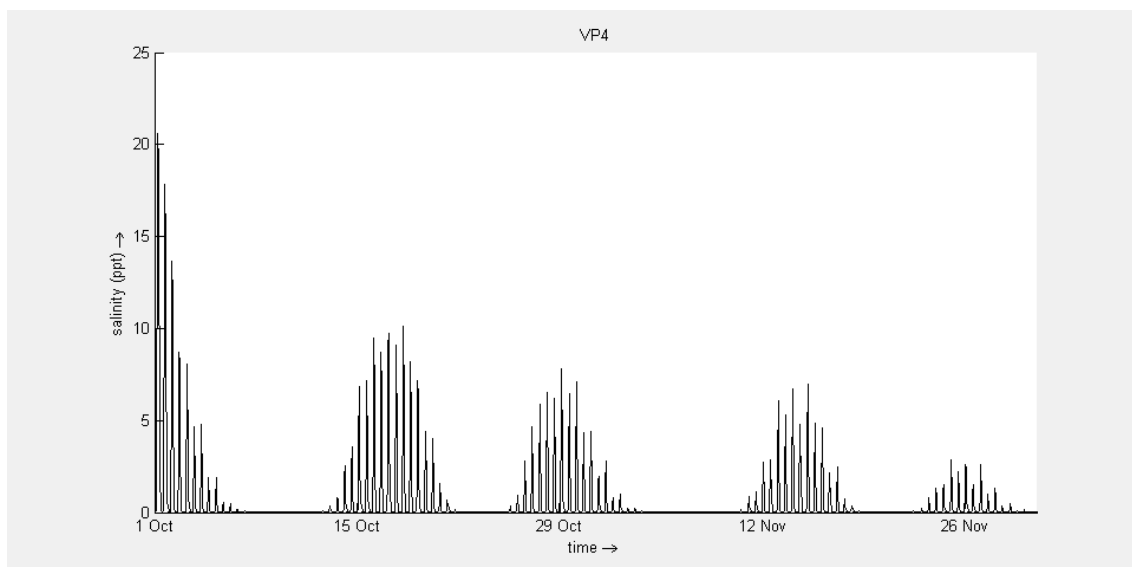


Figura B92. Resultados do cenário C8-500 (NMM = 0.77 m, Caudal = 500 m³/s) no ponto VP4.

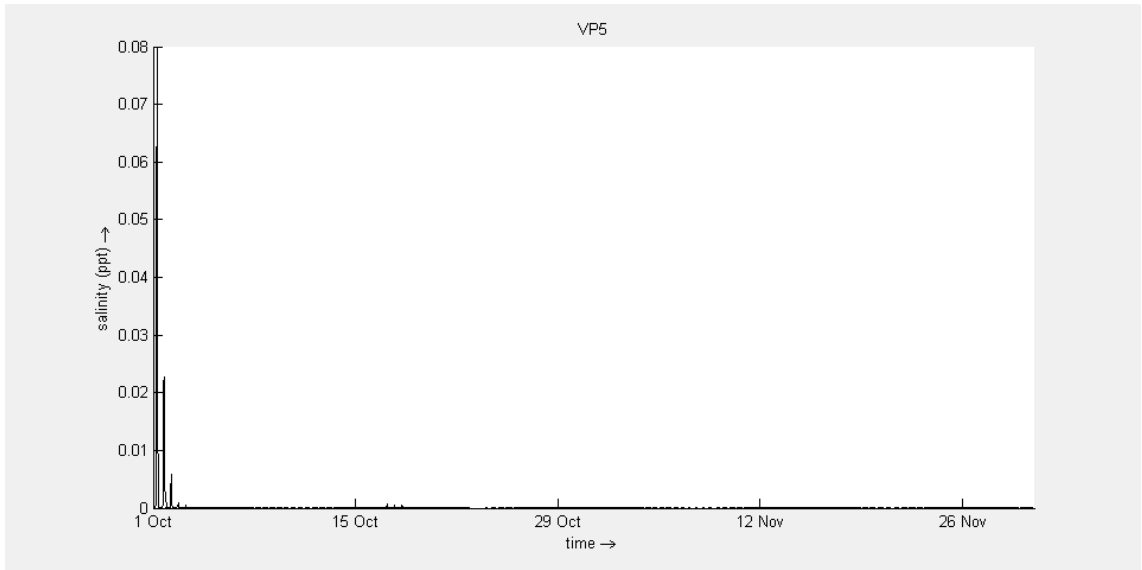


Figura B93. Resultados do cenário C8-500 (NMM = 0.77 m, Caudal = 500 m³/s) no ponto VP5.

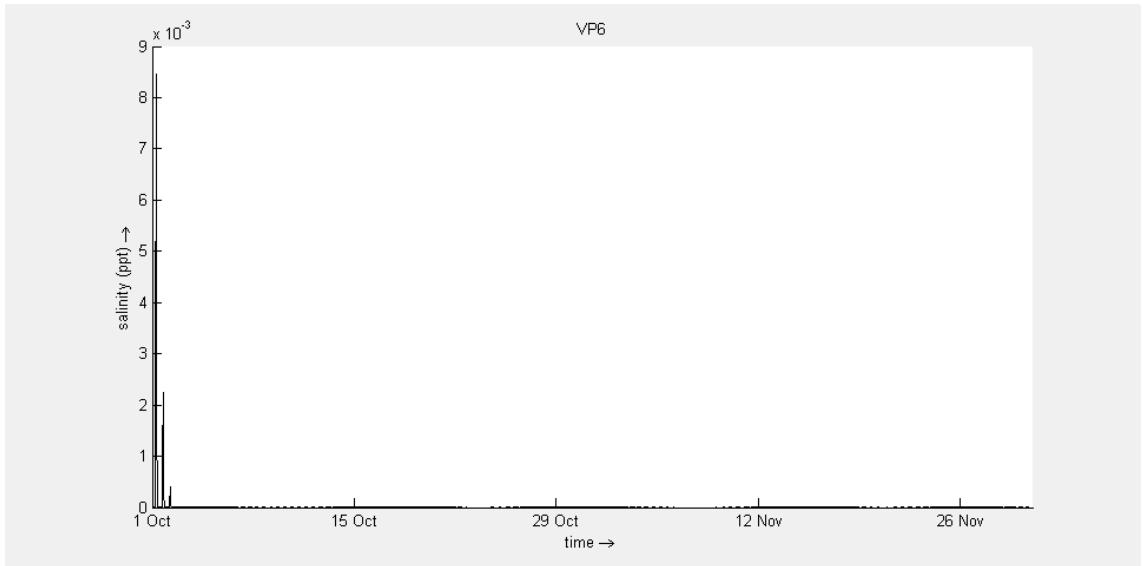


Figura B94. Resultados do cenário C8-500 (NMM = 0.77 m, Caudal = 500 m³/s) no ponto VP6.

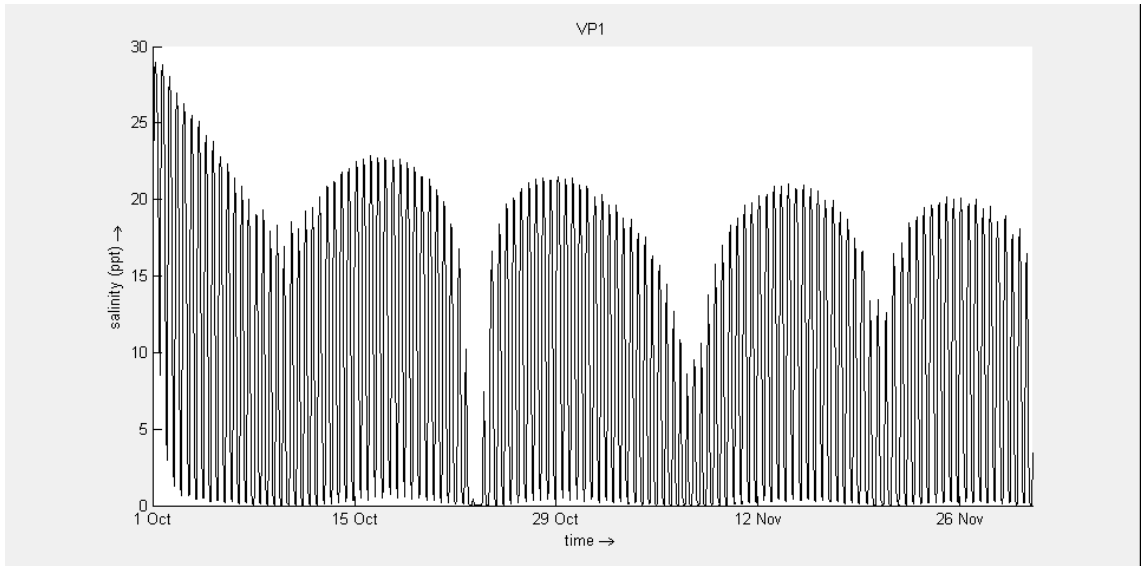


Figura B95. Resultados do cenário C8-700 (NMM = 0.77 m, Caudal = 700 m³/s) no ponto VP1.

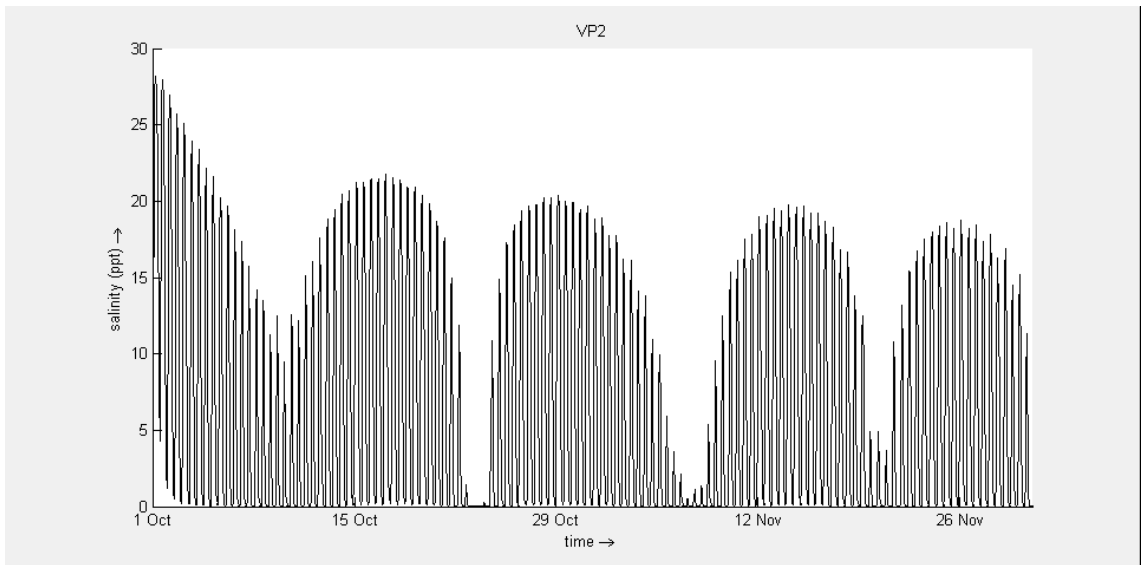


Figura B96. Resultados do cenário C8-700 (NMM = 0.77 m, Caudal = 700 m³/s) no ponto VP2.

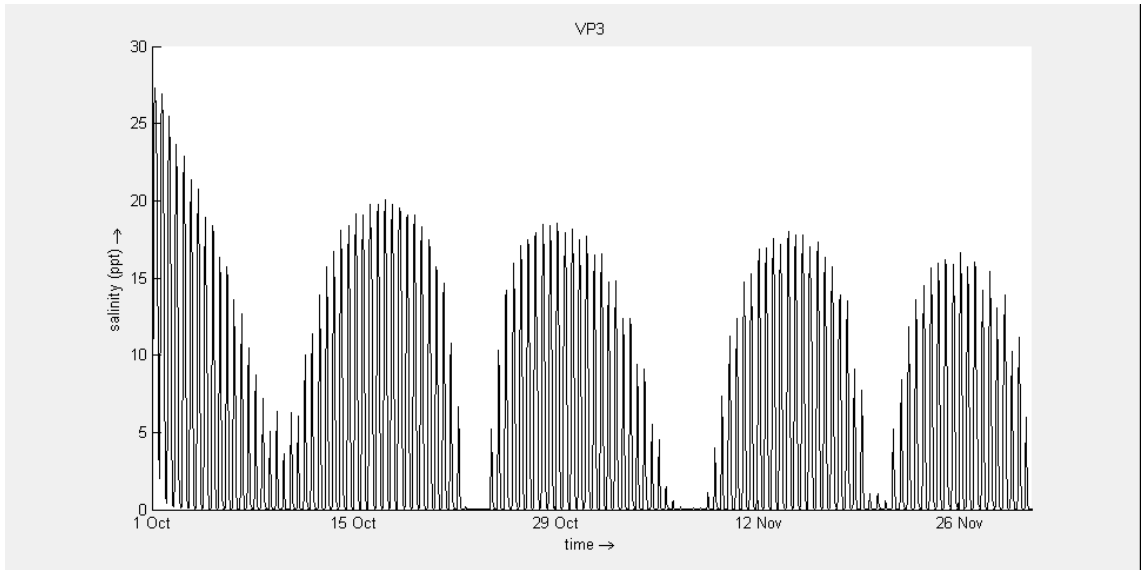


Figura B97. Resultados do cenário C8-700 (NMM = 0.77 m, Caudal = 700 m³/s) no ponto VP3.

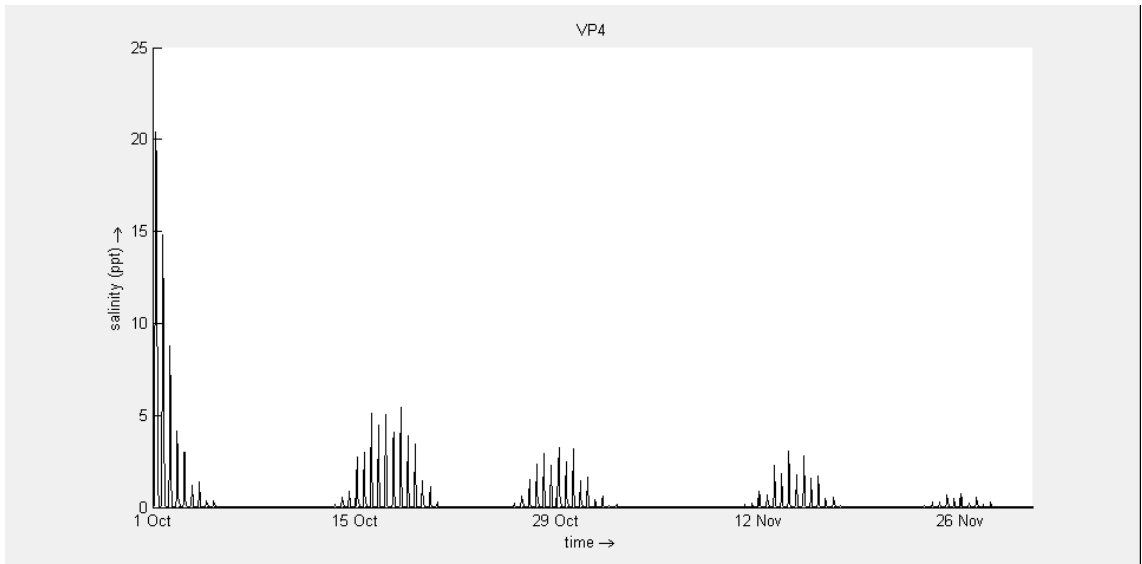


Figura B98. Resultados do cenário C8-700 (NMM = 0.77 m, Caudal = 700 m³/s) no ponto VP4.

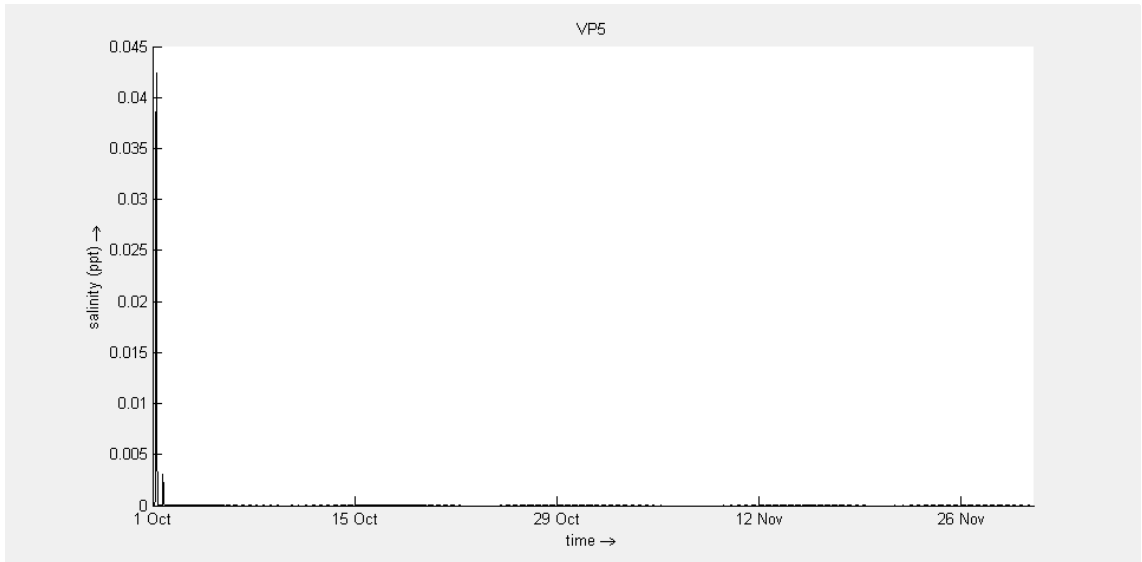


Figura B99. Resultados do cenário C8-700 (NMM = 0.77 m, Caudal = 700 m³/s) no ponto VP5.

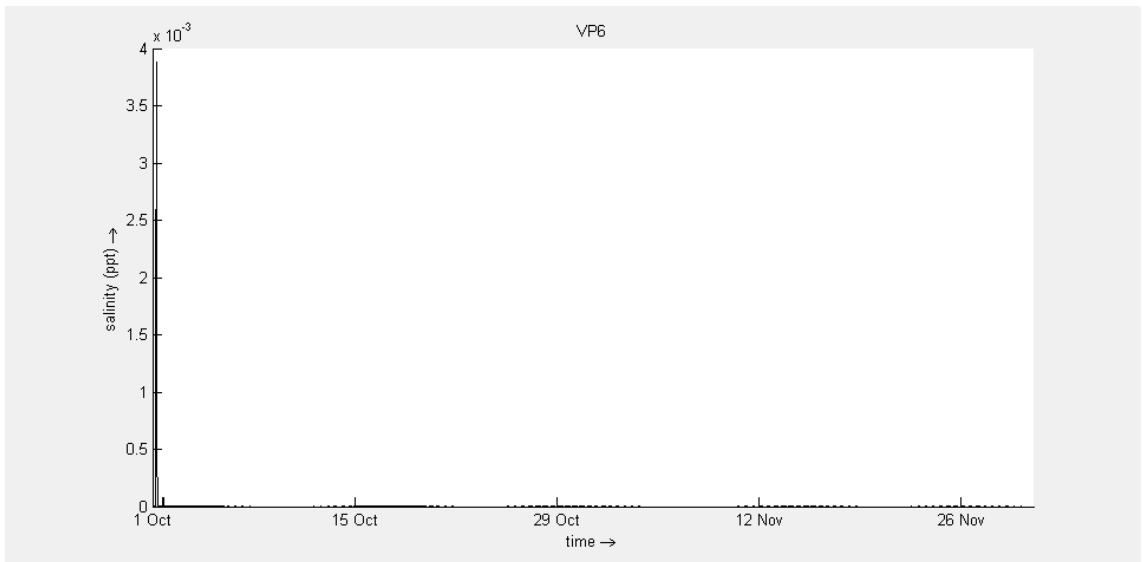


Figura B100. Resultados do cenário C8-700 (NMM = 0.77 m, Caudal = 700 m³/s) no ponto VP6.

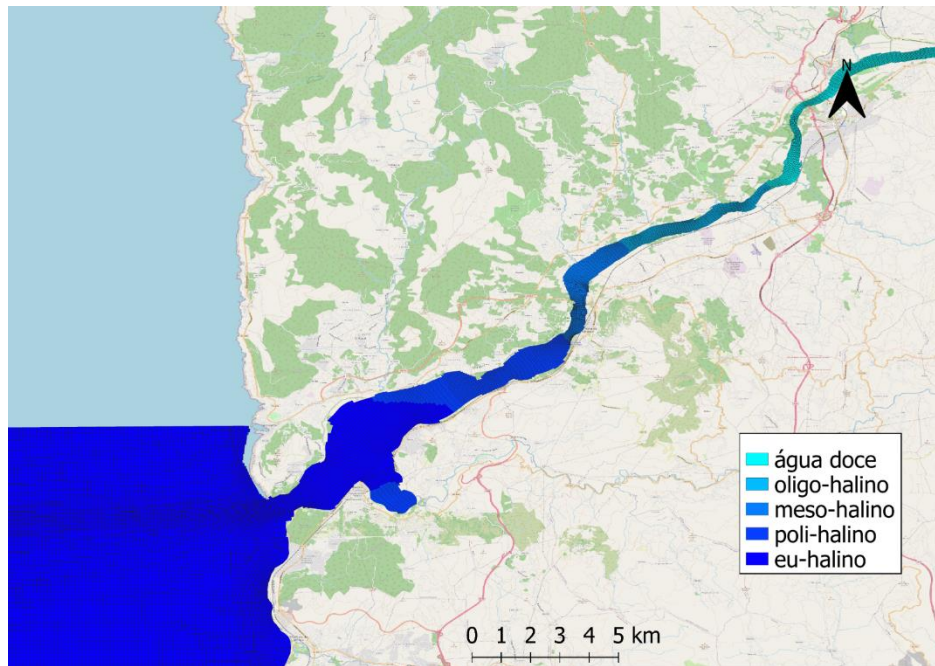


Figura B101. Resultados do cenário C8-20 (NMM = 0.77 m, Caudal = 20 m³/s) em situação de preia-mar de maré viva.

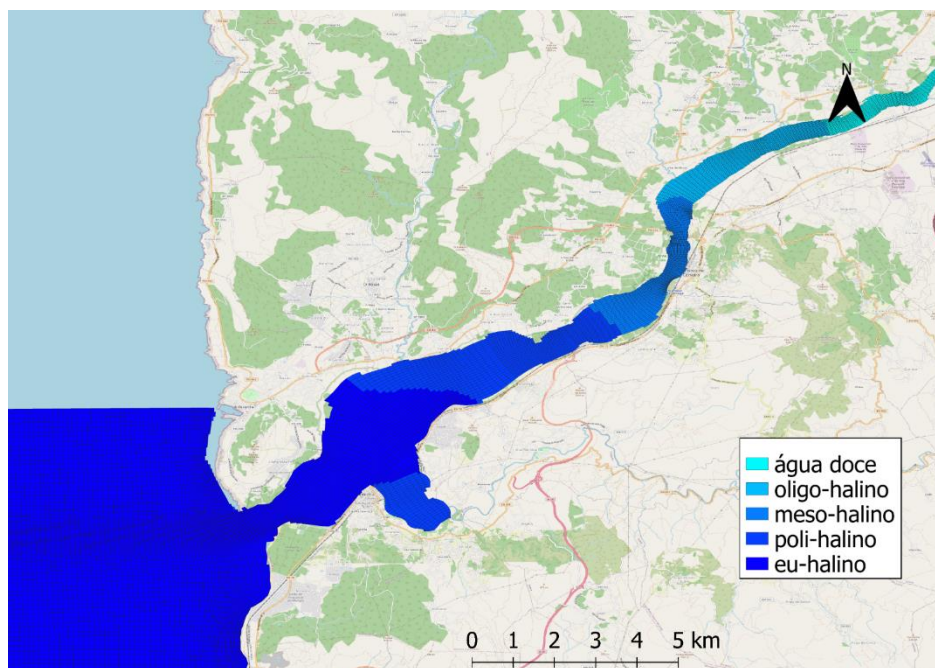


Figura B102. Resultados do cenário C8-30 (NMM = 0.77 m, Caudal = 30 m³/s) em situação de preia-mar de maré viva.

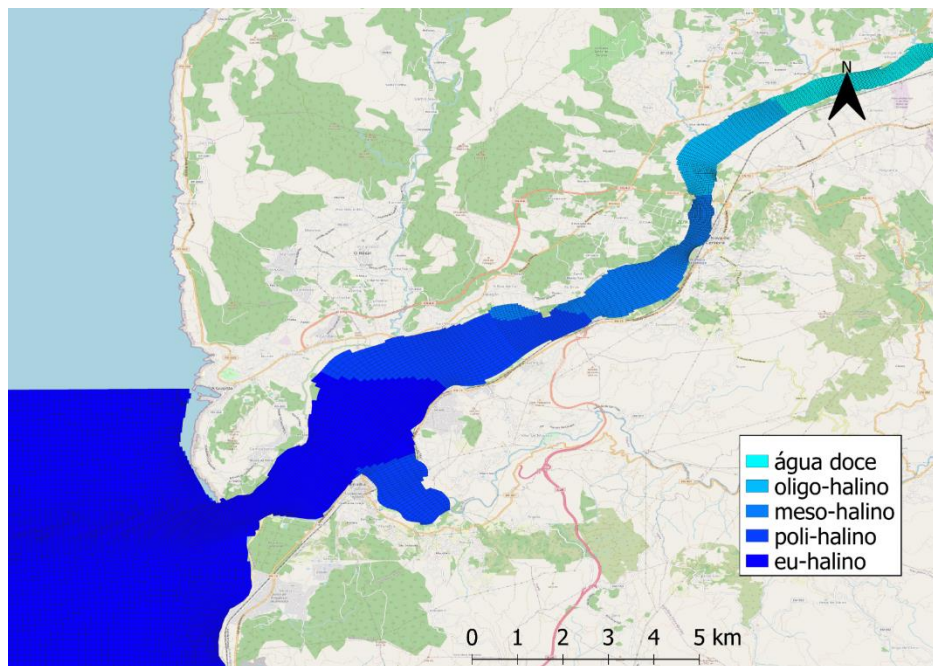


Figura B103. Resultados do cenário C8-40 (NMM = 0.77 m, Caudal = 40 m³/s) em situação de preia-mar de maré viva.

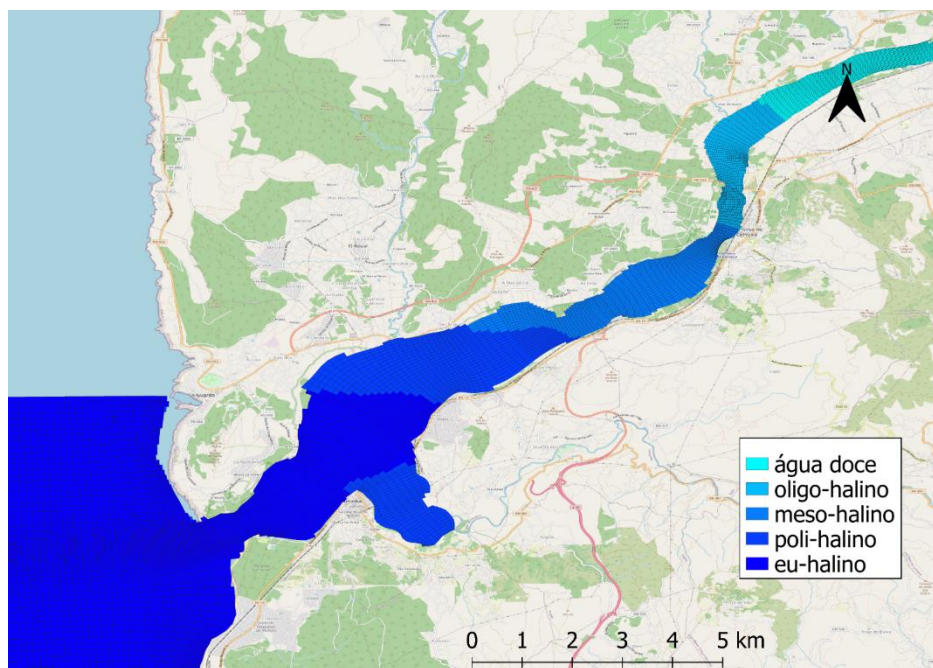


Figura B104. Resultados do cenário C8-50 (NMM = 0.77 m, Caudal = 50 m³/s) em situação de preia-mar de maré viva.

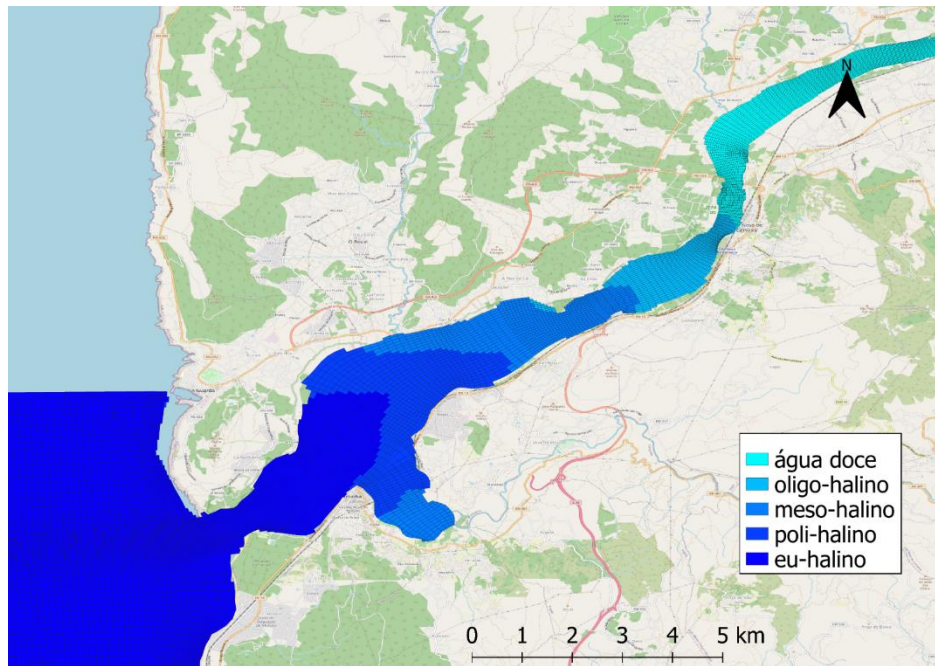


Figura B105. Resultados do cenário C8-100 (NMM = 0.77 m, Caudal = 100 m³/s) em situação de preia-mar de maré viva.

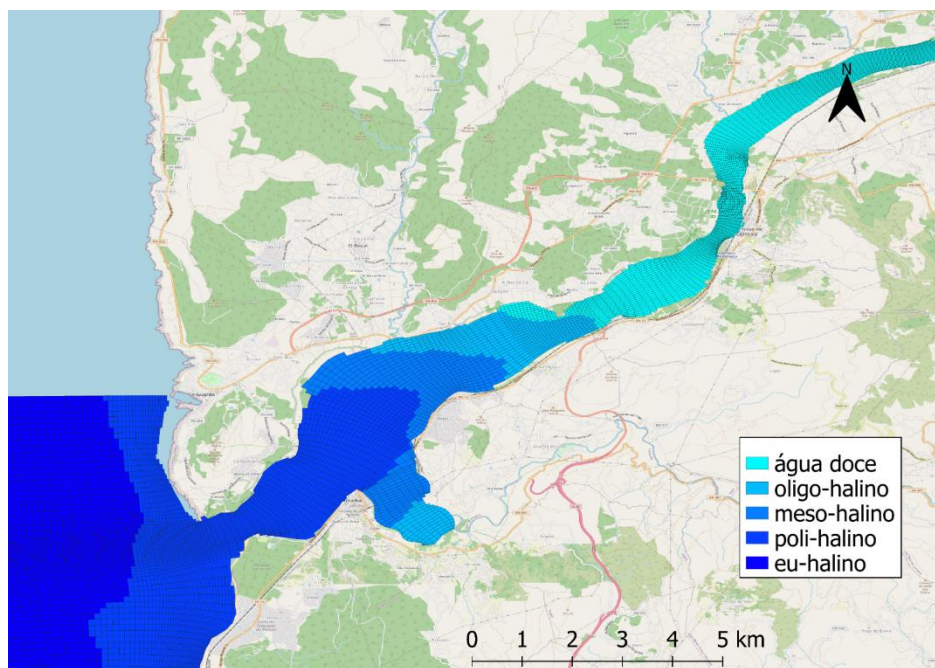


Figura B106. Resultados do cenário C8-300 (NMM = 0.77 m, Caudal = 300 m³/s) em situação de preia-mar de maré viva.

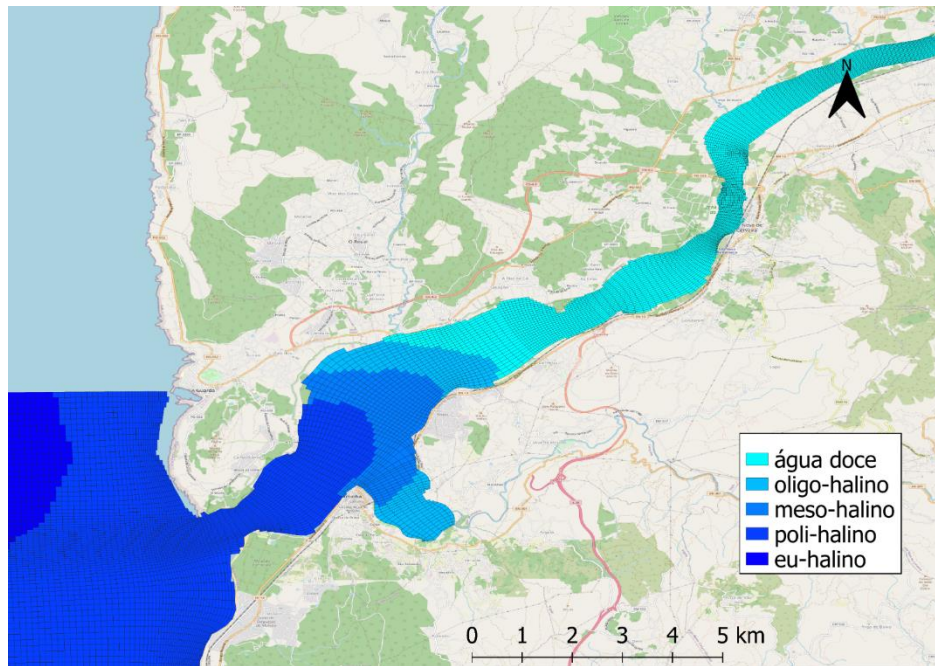


Figura B107. Resultados do cenário C8-500 (NMM = 0.77 m, Caudal = 500 m³/s) em situação de preia-mar de maré viva.

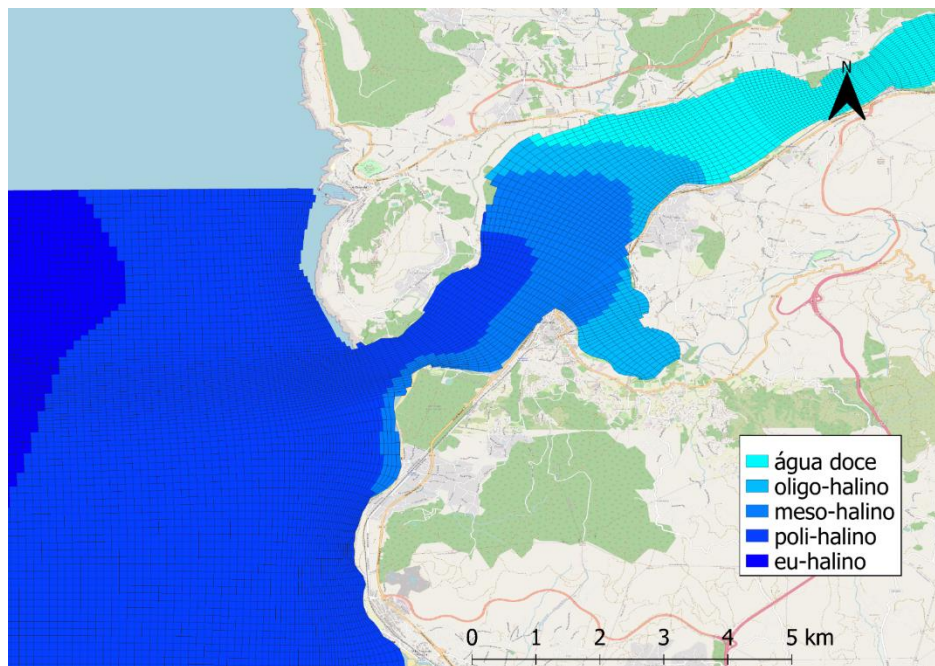


Figura B108. Resultados do cenário C8-700 (NMM = 0.77 m, Caudal = 700 m³/s) em situação de preia-mar de maré viva.