

Figura 107 – Distribuição espacial das medianas das concentrações de alumínio nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017.

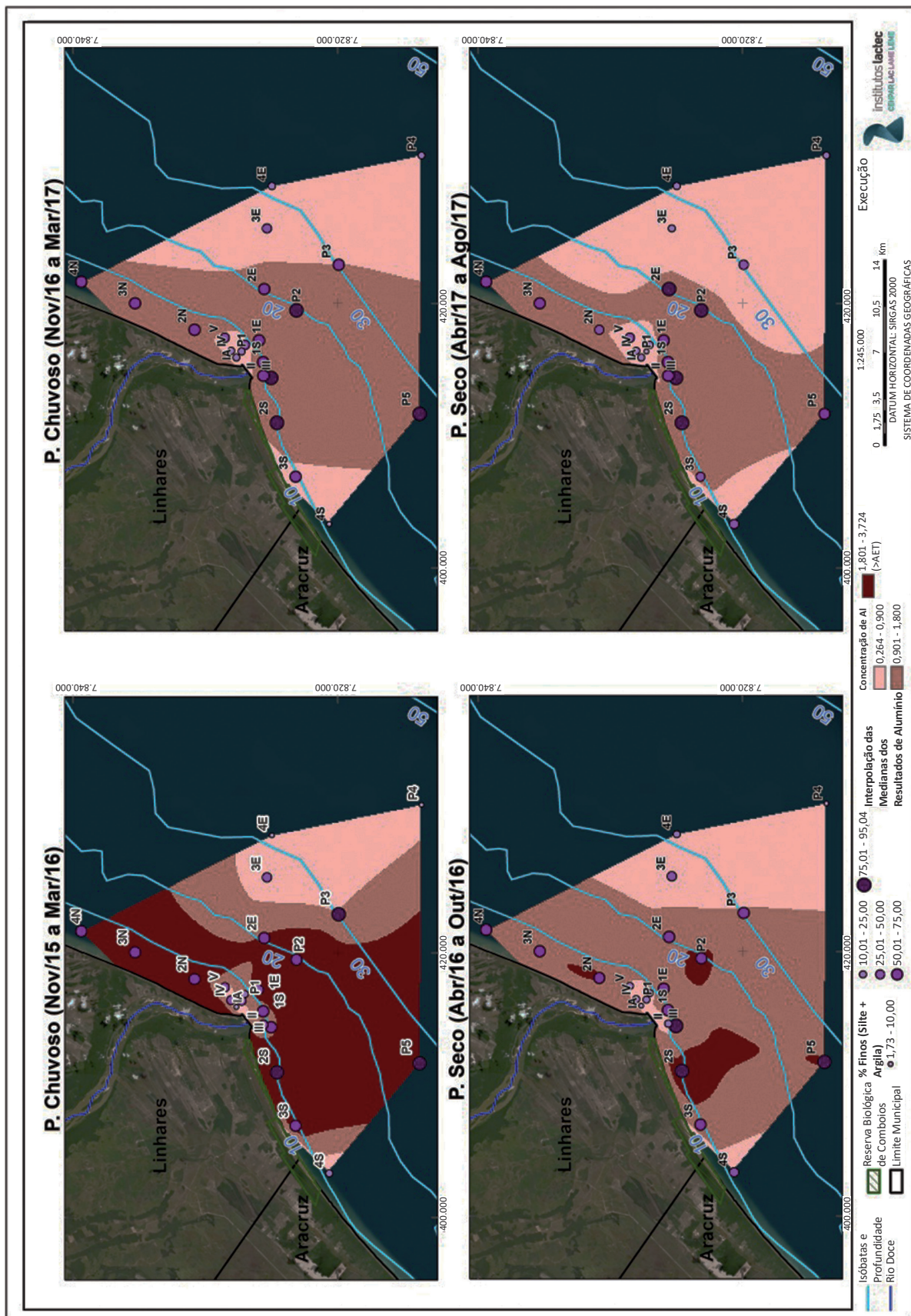


Figura 108 – Detalhe da distribuição espacial das medianas das concentrações de alumínio na foz do rio Doce nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017.

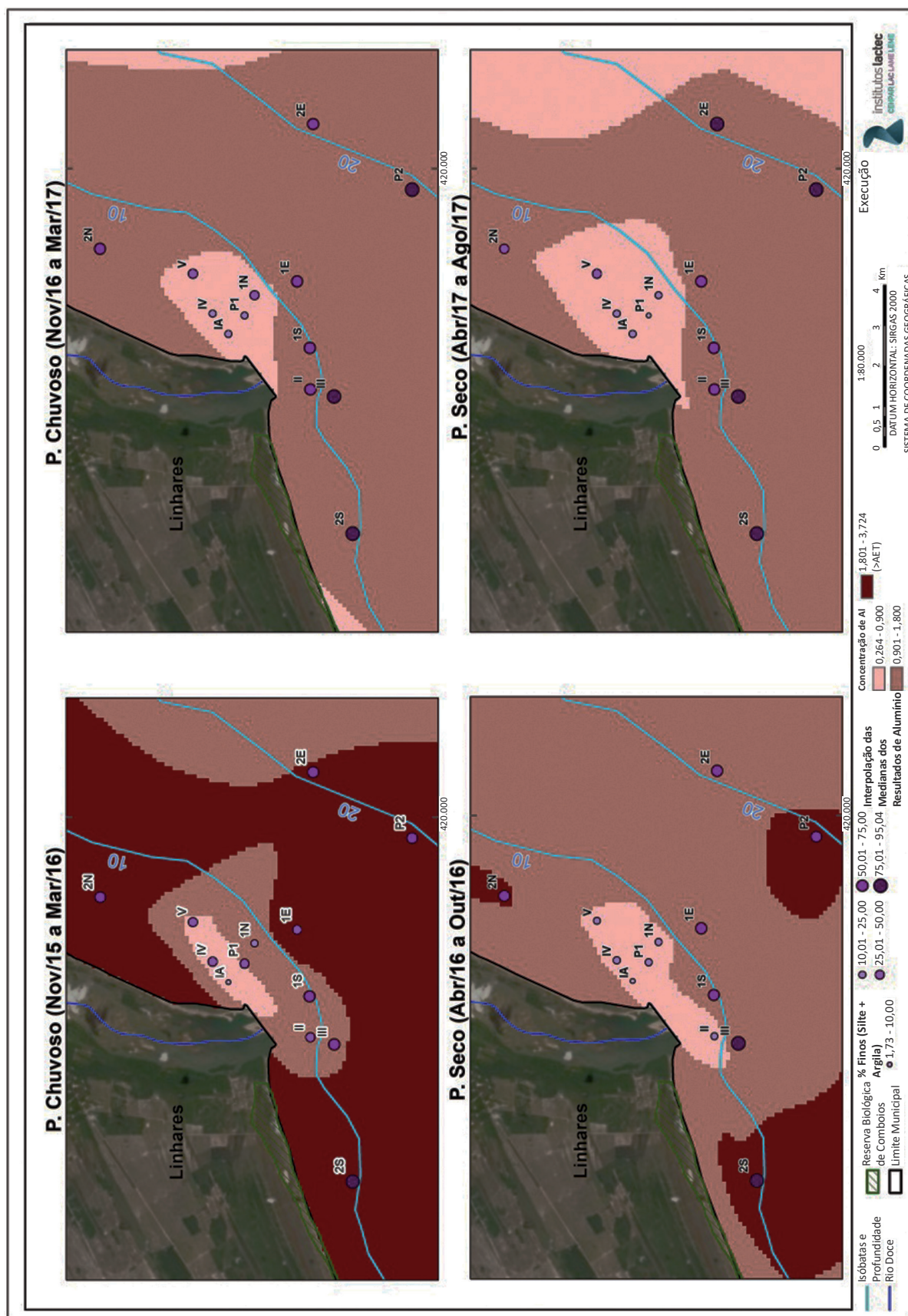
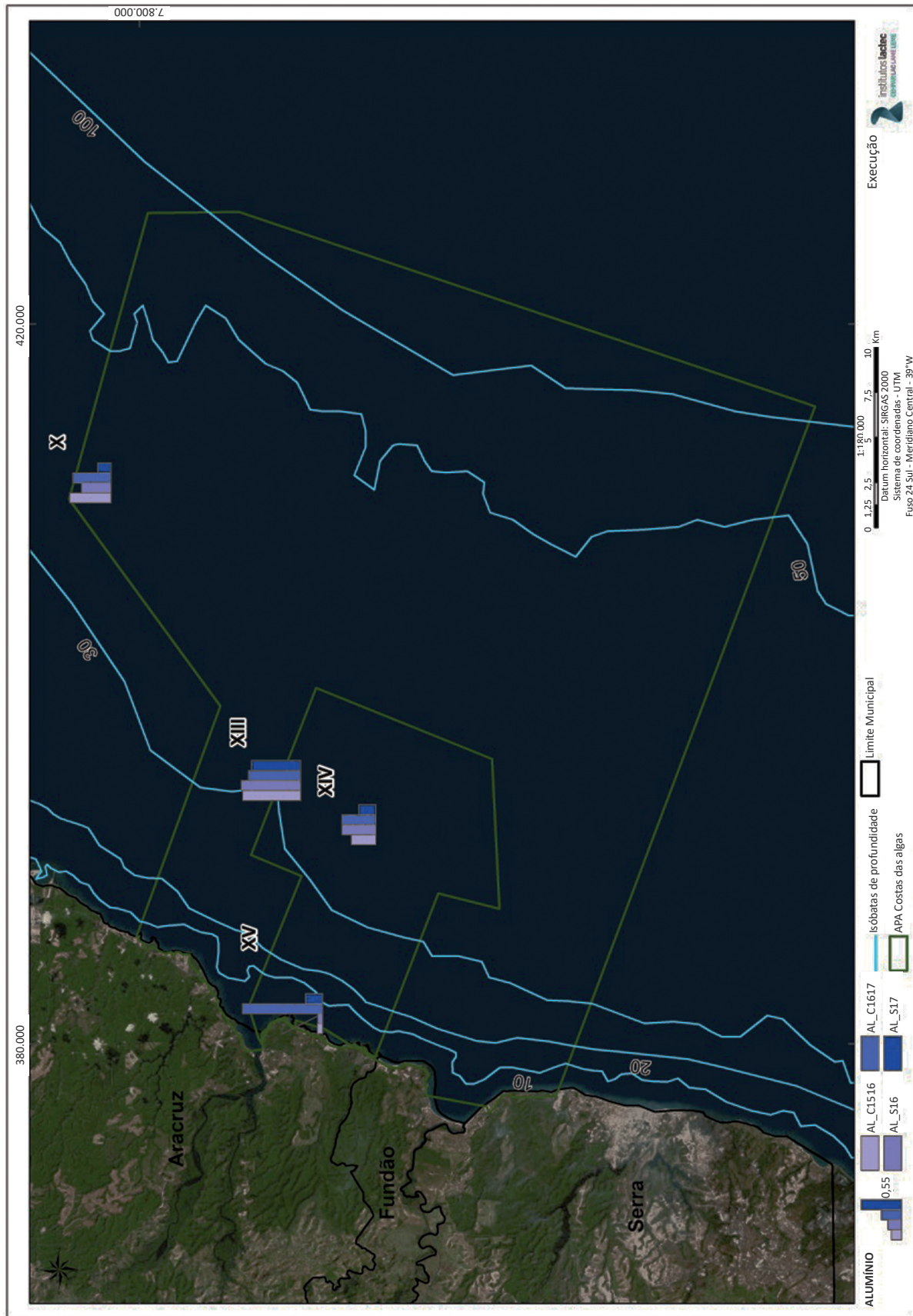


Figura 109 – Representação espacial das medianas das concentrações de alumínio nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017 na região da Costa das Algas.

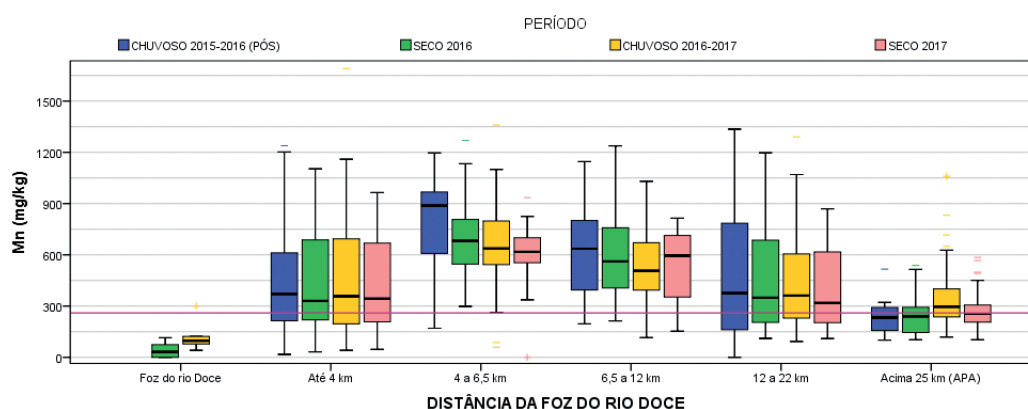


5.2.2.1.3 Manganês (Mn)

Para as concentrações de Mn, verificou-se uma marcada diferenciação entre os resultados obtidos nas amostras oriundas da foz do rio Doce em comparação com os demais pontos amostrados a diversas distâncias da foz do rio Doce (Figura 114, Figura 115 e Figura 116). Todas as medianas verificadas nas distâncias inferiores a 4 até 22 km da foz do rio Doce apresentaram valores superiores a 260 mg/kg (AET), sendo que, nas amostras localizadas na APA Costa das Algas (distância superior a 25 km) foi verificada mediana superior a AET no período chuvoso de 2016-2017 (Figura 110).

A mineralogia dos óxidos de manganês nos sedimentos pode apresentar variações. Geralmente, acredita-se que esses óxidos sejam materiais amorfos e sejam frequentemente encontrados como revestimentos em partículas sedimentares inorgânicas (por exemplo, argilas) ou biogênicas (por exemplo, testas silicosas). Estes óxidos também são geralmente encontrados em íntima associação com óxidos de ferro sedimentares (BURDIGE 1993). Desta forma, concentrações elevadas deste elemento em todas as regiões (exceto na foz do rio Doce) podem estar relacionadas tanto com fontes continentais (deposição de argilas) quanto com marinhas/autigênicas (estruturas biogênicas). As baixas concentrações de Mn na foz do rio Doce podem estar relacionadas às baixas deposições de sedimentos lamosos neste ponto amostrado, conforme já relatado anteriormente.

Figura 110 – Diagrama de caixa das concentrações de manganês nos conjuntos de pontos amostrados a diferentes distâncias da foz do rio Doce. Linha lilás = nível de efeito aparente (AET).



De acordo com resultados obtidos por UFES (2017) com amostras de MPS no período pré e pós chegada da pluma de rejeitos no ambiente estuarino, concentrações de Mn acima da AET já eram verificadas anteriormente à formação da pluma (Figura 111). Já no estudo realizado por GOLDBERGER (2016) em amostras de sedimento do ambiente estuarino, de praia e no oceano, verificou-se que concentrações acima do AET foram observadas apenas em amostras oceânicas, indicando que este ambiente seria o mais adequado para a deposição (Figura 112). O estudo realizado por ROMERO (2017) em amostras estuarinas em diversos estratos após a chegada da pluma, apresentou concentrações de Mn neste ambiente predominantemente superiores ao AET até o estrato de 5-10 cm, com os estratos inferiores apresentando mediana abaixo deste limiar, além da concentração de Mn em amostra de lama proveniente da barragem de rejeitos (PLama) apresentando concentração acima do AET (Figura 113).

Figura 111 – Concentrações de manganês no material particulado em suspensão do ambiente estuarino em momento anterior e posterior à chegada da pluma de rejeitos (UFES, 2017).

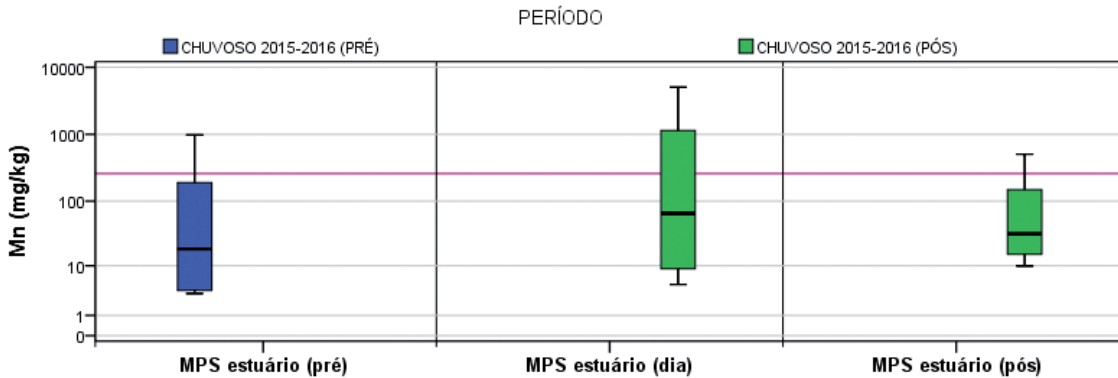


Figura 112 – Concentrações de manganês no ambiente estuarino, praia e oceano (GOLDER, 2016).

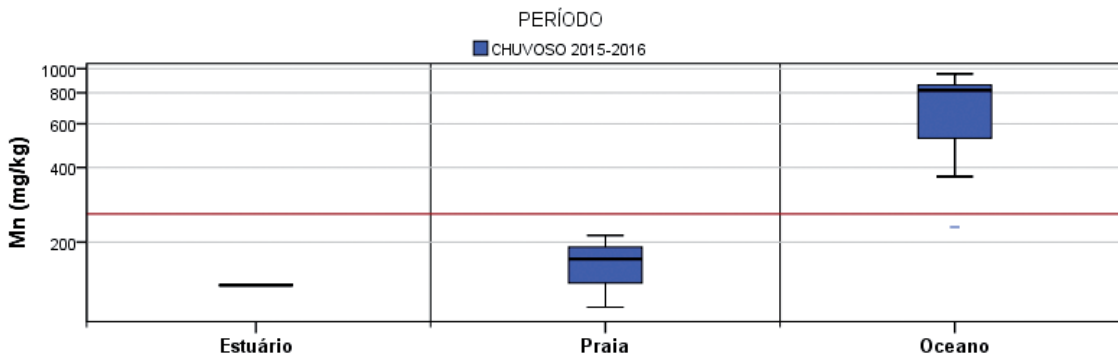
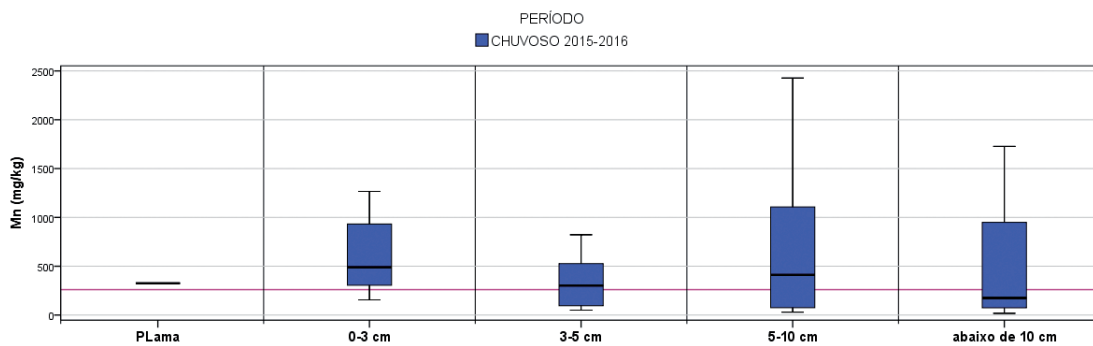


Figura 113 – Concentrações de manganês em secções de diferentes profundidades dos sedimentos do estuário e na lama de rejeitos (ROMERO, 2017).



Apesar das concentrações de Mn na lama de rejeitos depositada na região estuarina apresentar concentrações elevadas de Mn, um estudo realizado na região próxima à foz do rio Doce por AGUIAR et al. (2014) apresentou concentração de Mn de 1003 mg/kg, indicando que concentrações elevadas de Mn já eram verificadas na região anteriormente ao rompimento da barragem do Fundão. Esta hipótese é reforçada por CPMAIS (2015) e PETROBRAS (2007), onde estudos realizados na região da APA Costa das Algas indicaram para concentrações de Mn preferencialmente superiores a 520 mg/kg no período chuvoso e predominantemente superiores a 680 mg/kg no período seco (CPMAIS, 2015) e concentrações de 423 e 525 mg/kg no período chuvoso (PETROBRAS, 2007).

Figura 114 – Distribuição espacial das medianas das concentrações de manganês nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017.

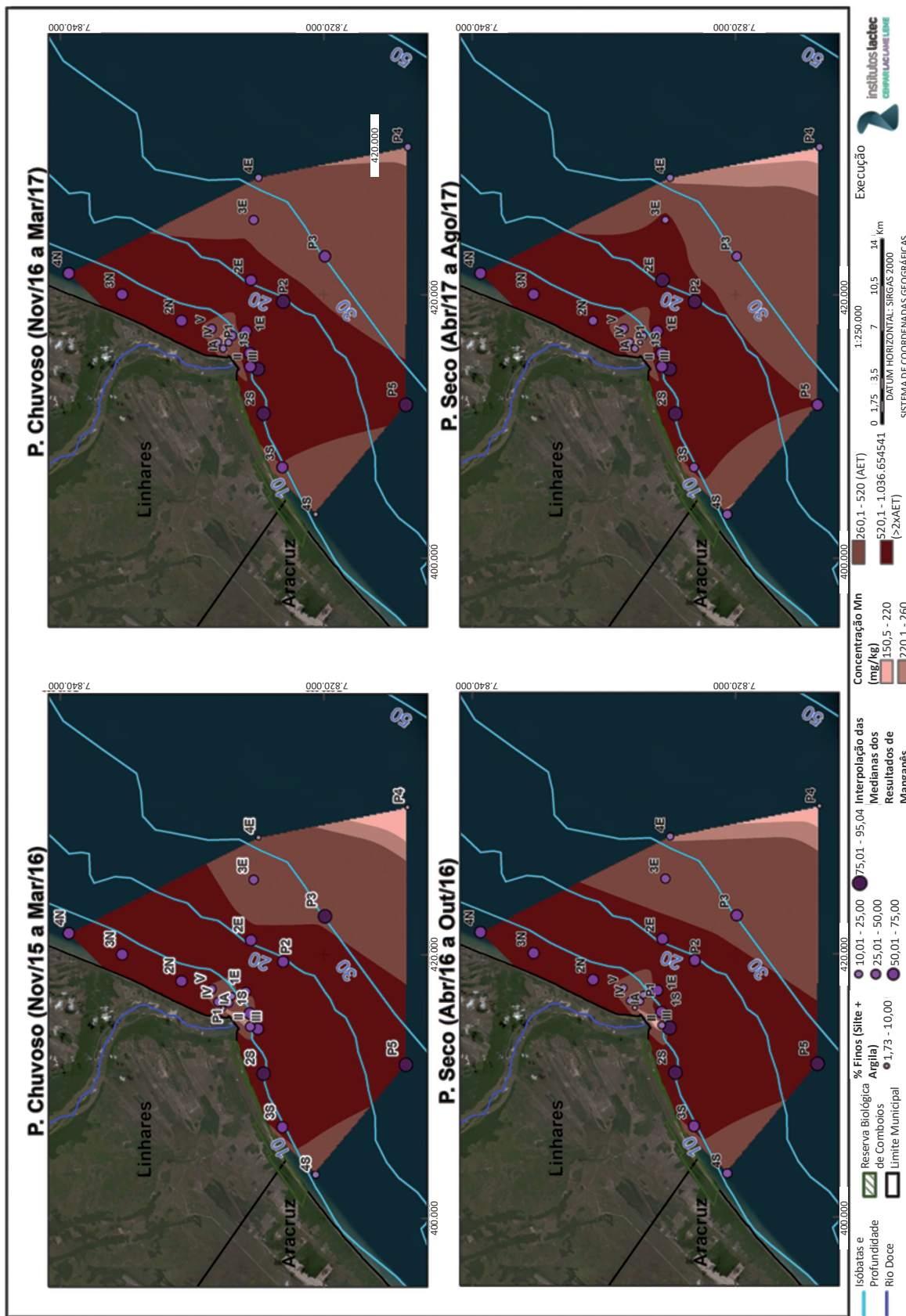


Figura 115 – Detalhe da distribuição espacial das medianas das concentrações de manganês na foz do rio Doce nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017.

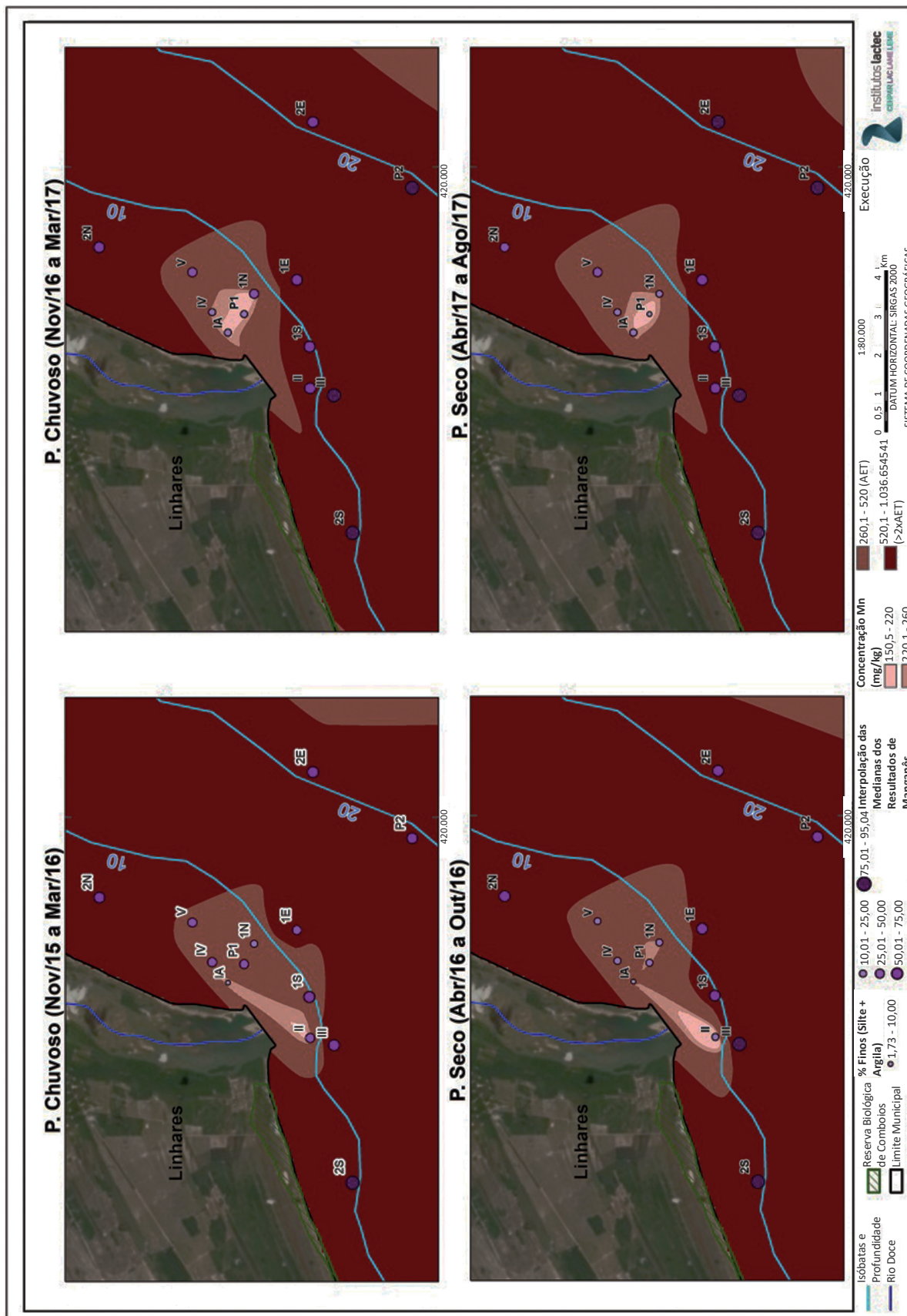
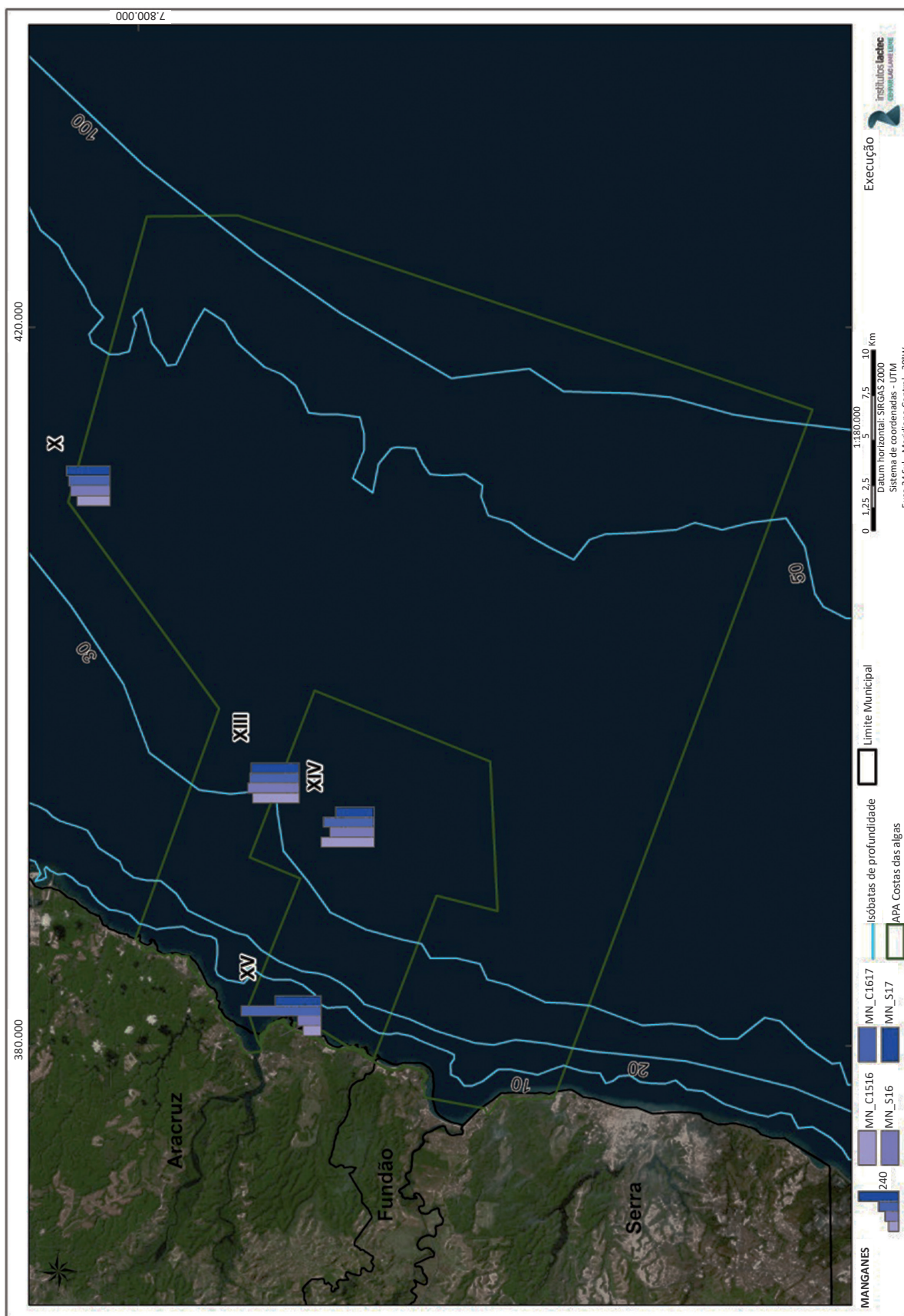


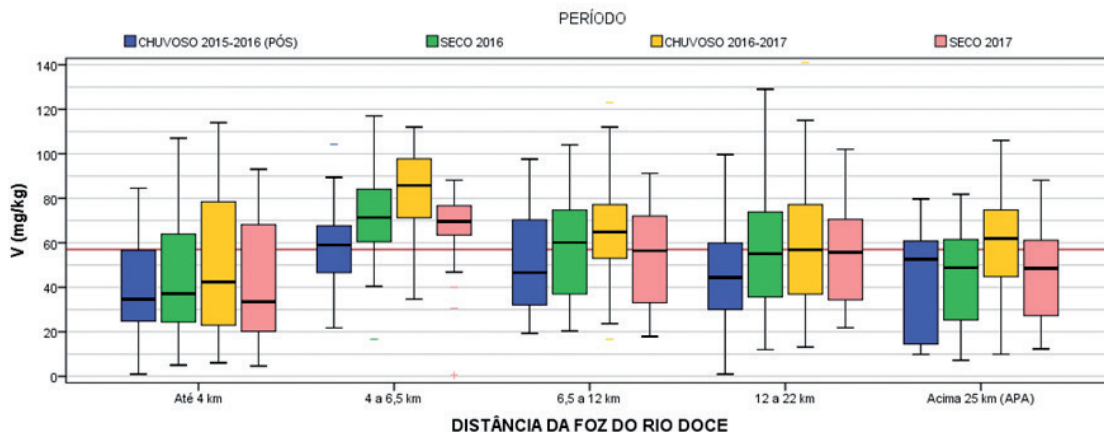
Figura 116 – Representação espacial das medianas das concentrações de manganês nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017 na região da Costa das Algas.



5.2.2.1.4 Vanádio (V)

Em todas as distâncias da foz do rio Doce monitoradas foram verificadas concentrações de V superiores ao valor de AET (57 mg/kg), sendo que apenas na distância de 4 a 6,5 km a mediana de todos os períodos monitorados superou este valor (Figura 117). As concentrações de V em todas as regiões variaram desde valores próximos a 20 mg/kg a concentrações superiores a 110 mg/kg, indicando uma grande variabilidade deste elemento na região (Figura 120, Figura 121 e Figura 122).

Figura 117 – Diagrama de caixa das concentrações de vanádio nos conjuntos de pontos amostrados a diferentes distâncias da foz do rio Doce. Linha lilás = nível de efeito aparente (AET).



As concentrações de V em sedimentos marinhos estão estritamente relacionadas com precipitação de carbonatos de origem marinha (LACERDA e MARINS, 2006), o que pode explicar a distribuição similar entre as concentrações observadas a diversas distâncias da foz do rio Doce. Apesar do elemento V apresentar no ambiente marinho uma relação com a precipitação de carbonatos, foi verificada em amostras de MPS concentrações de V superiores ao AET, tanto no período pré quanto após a chegada da pluma de rejeitos ao oceano (UFES, 2017). Isso indica que as concentrações de V encontradas na região podem ter uma contribuição importante do aporte continental, independentemente do aporte gerado pela pluma de rejeitos. Já o estudo de GOLDER (2016), realizado no sedimento após a chegada da pluma de rejeitos na região, apresentou para o ambiente estuarino concentrações de V próximas ao valor de AET, enquanto que em amostras de praia e de oceano as concentrações variaram em torno de 1000 mg/kg. Dados prévios da região, obtidos por PETROBRAS (2007), apresentaram concentrações de V no sedimento de 36,4 e 58,2 mg/kg, reforçando a ocorrência de concentrações elevadas de V na região mesmo antes do rompimento da barragem do Fundão.

Figura 118 – Concentrações de vanádio no material particulado em suspensão do ambiente estuarino em momento anterior e posterior à chegada da pluma de rejeitos (UFES, 2017).

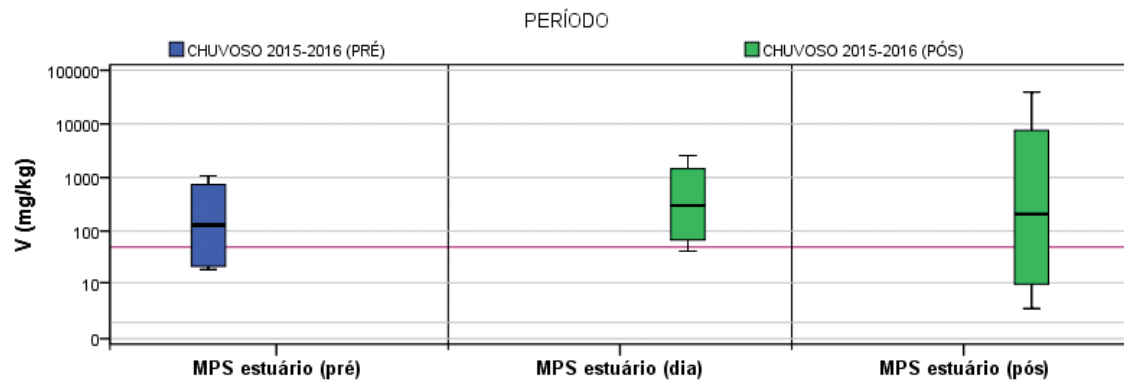


Figura 119 – Concentrações de vanádio no ambiente estuarino, praia e oceano (GOLDER, 2016).

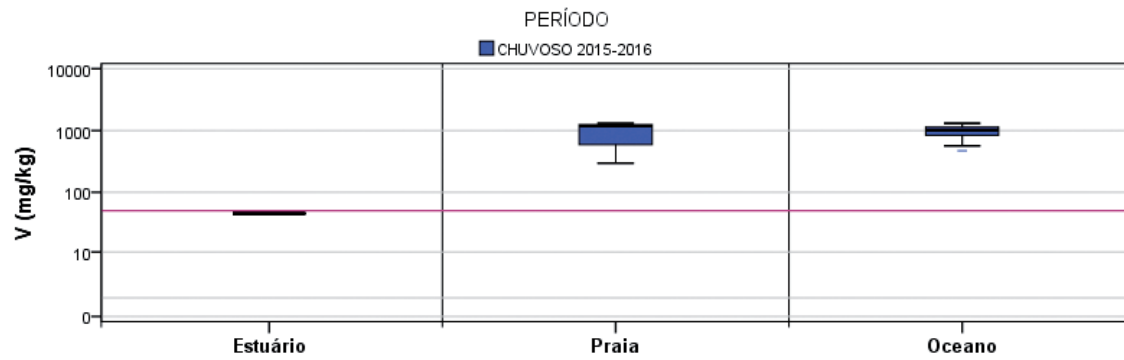


Figura 120 – Distribuição espacial das medianas das concentrações de vanádio nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017.

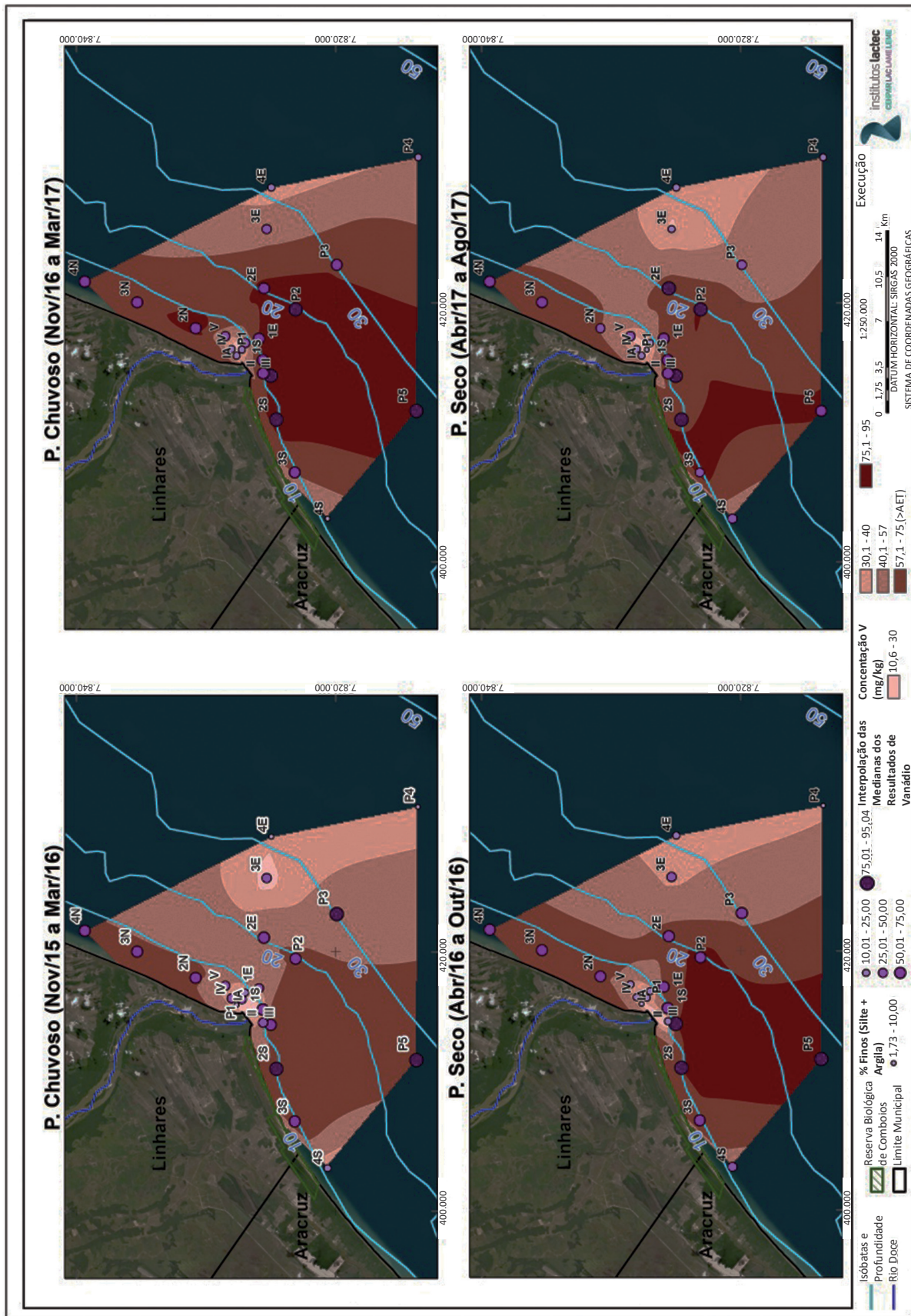


Figura 121 – Detalhe da distribuição espacial das medianas das concentrações de vanádio na foz do rio Doce nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017.

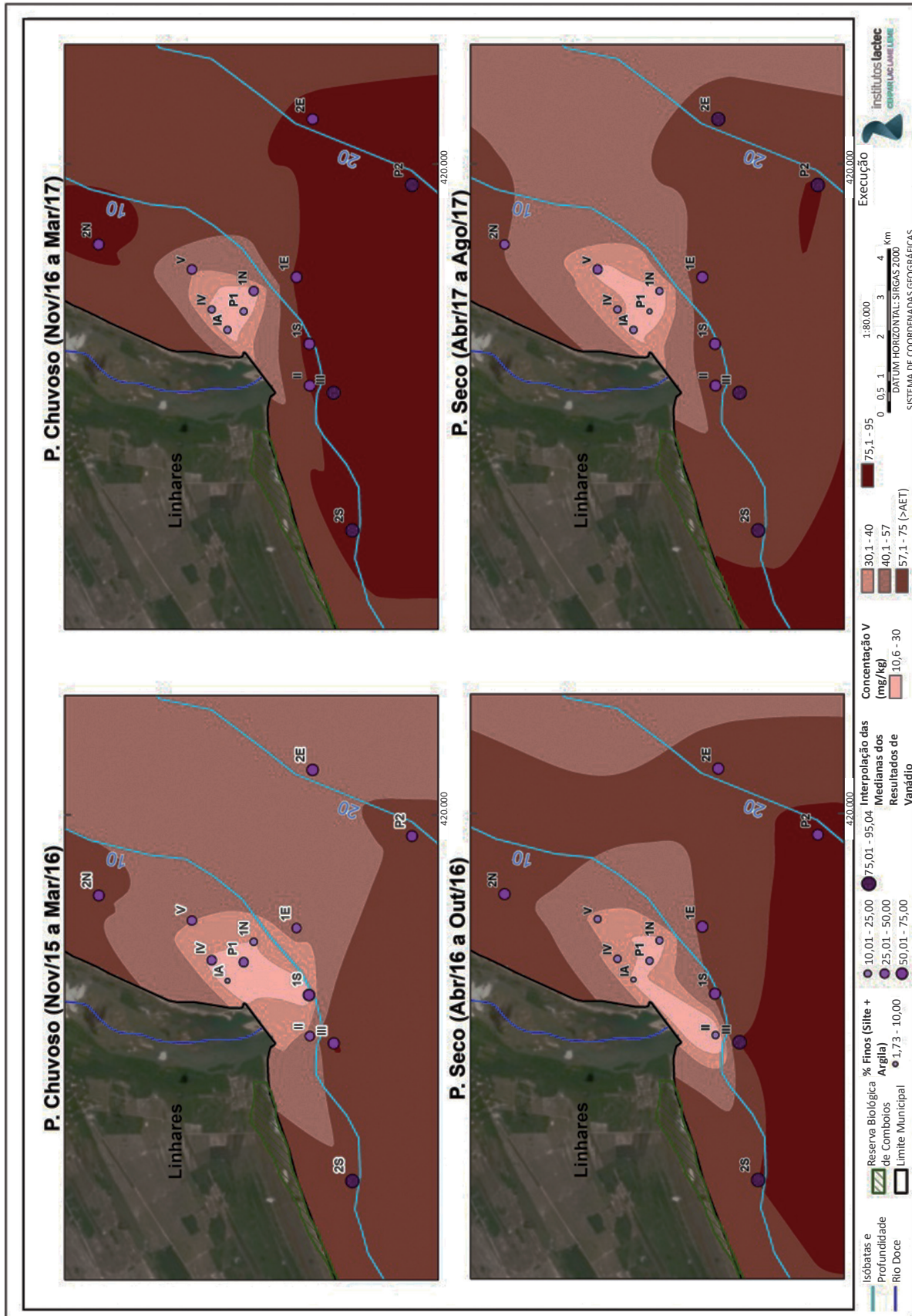
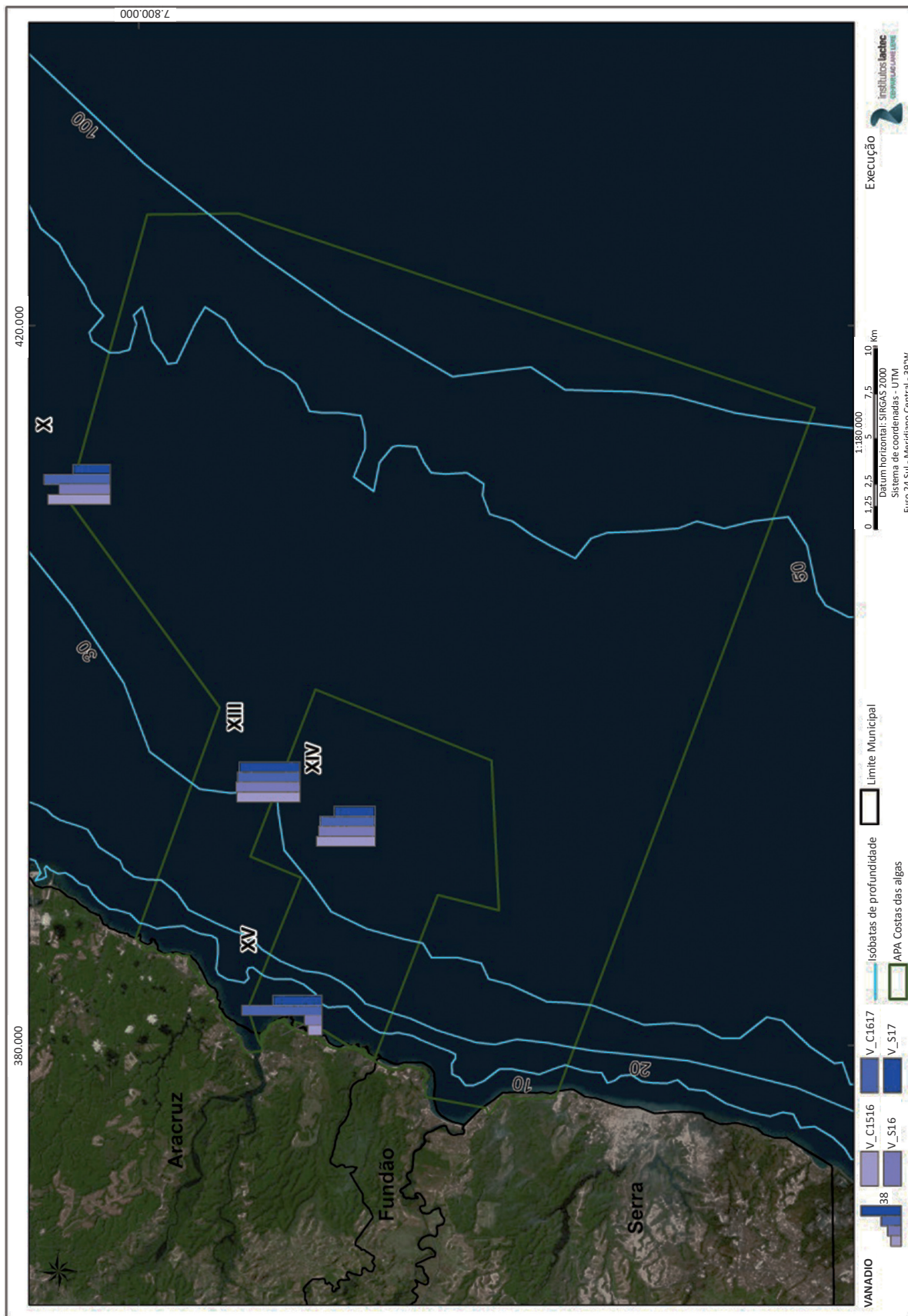


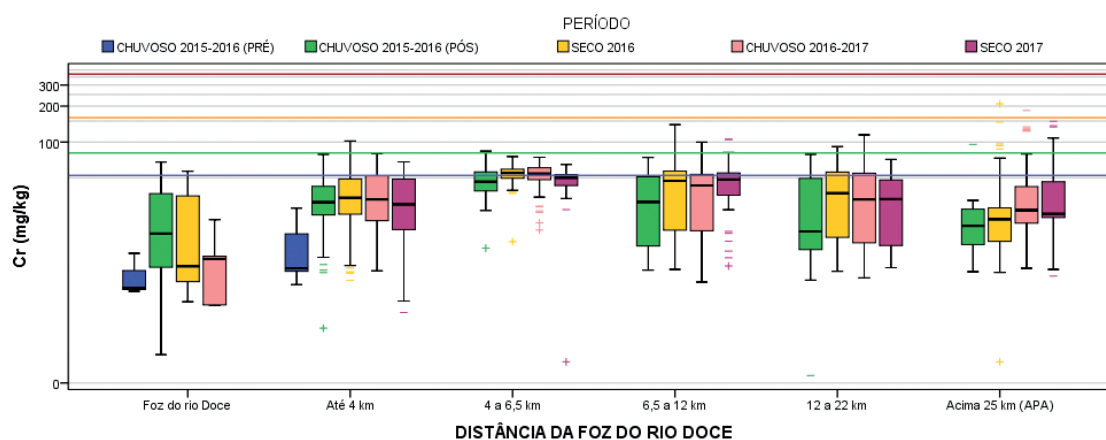
Figura 122 – Representação espacial das medianas das concentrações de vanádio nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017 na região da Costa das Algas.



5.2.2.1.5 Cromo (Cr)

As concentrações de Cr nos pontos de monitoramento do sedimento marinho mantiveram-se predominantemente em níveis inferiores ao nível de efeitos limiares (*Threshold Effect Levels – TEL*) de 52,3 mg/kg na maioria das distâncias da foz do rio Doce monitoradas, exceto nos pontos localizados entre 4 e 6,5 km da foz, onde as medianas do período seco de 2016 e período chuvoso de 2016-2017 foram superiores a este valor (Figura 123). Estas medianas, no entanto, mantiveram-se inferiores ao nível de efeitos baixos (*Effect Range Low – ERL*). Apenas valores isolados e apresentados como *outliers* ultrapassaram o nível de efeitos prováveis (*Probable Effect Level – PEL*), indicando, desta forma, que os sedimentos monitorados apresentam concentrações de Cr em níveis pouco preocupantes quanto a eventuais impactos ao ecossistema da região. As amostras de sedimento coletadas na região da foz do rio Doce e em pontos localizados em distâncias inferiores a 4 km da foz anteriormente à chegada da pluma de rejeitos à região no período chuvoso de 2015-2016 apresentaram medianas de Cr inferiores às observadas nos demais períodos após a chegada no oceano da pluma de rejeitos, indicando para um aumento das concentrações deste metal em decorrência da presença destes rejeitos na região, além de uma tendência de restabelecimento dos níveis pré-desastre no período chuvoso de 2016-2017 na região da foz do rio Doce (Figura 127, Figura 128 e Figura 129). No entanto, o número limitado de amostras do período amostrado antes da chegada da pluma na região prejudica a representatividade das condições pré-desastre por este conjunto de amostras.

Figura 123 – Diagrama de caixa das concentrações de cromo nos conjuntos de pontos amostrados a diferentes distâncias da foz do rio Doce. Linha azul = nível de efeitos limiares (TEL); linha verde = nível de efeitos baixos (ERL); linha laranja = nível de efeitos prováveis (PEL); linha vermelha = nível de efeitos médios.



Concentrações de cromo total em sedimentos marinhos e estuarinos não contaminados estão geralmente na faixa de 50 a 100 mg/kg. Os sedimentos de maior granulometria contêm uma proporção maior do cromo total na fração residual não biodisponível, enquanto que os sedimentos argilosos ricos em orgânicos contêm uma proporção maior do cromo total na fração orgânica, mais biodisponível. Em sedimentos relativamente não contaminados, 70% ou mais do cromo total pode estar associado à fração residual, associado principalmente aos minerais pesados, cromita, magnetita cromífera e espinélios, e à rede de aluminossilicato de minerais argilosos (NEFF, 2002).

As concentrações de Cr verificadas em amostras de MPS obtidas na região estuarina do rio Doce por UFES (2017) apresentaram concentrações que ultrapassaram o nível de efeitos médios (ERM) mesmo antes da chegada da pluma de rejeitos à região estuarina, indicando concentrações elevadas de Cr e potencialmente prejudiciais à biota não relacionadas à pluma de sedimentos oriunda do rompimento da barragem do Fundão, o que é reforçado pela diminuição das concentrações de Cr a níveis inferiores ao TEL nos dias seguintes à chegada da pluma de rejeitos (Figura 124). Com relação ao estudo realizado por GOLDER (2016), verificou-se um comportamento crescente entre as concentrações de Cr observadas no sedimento estuarino em relação ao amostrado em praias e no ambiente oceânico, sendo que neste último, apesar de apresentar concentrações superiores ao TEL, todos os resultados mantiveram-se inferiores a ERL, indicando baixos riscos à biota da região (Figura 125). A concentração de Cr verificada na amostra de lama de rejeitos depositada próximo à foz do rio Doce (PLama) apresentou concentração de 18,8 mg/kg, valor similar ao verificado nos diversos estratos de sedimento coletados no ambiente estuarino, sendo todos inferiores ao TEL, reforçando a ausência de indícios de enriquecimento de Cr a níveis prejudiciais à biota da região em decorrência do rompimento da barragem de rejeitos (Figura 126).

Figura 124 – Concentrações de Cr no material particulado em suspensão do ambiente estuarino em momento anterior e posterior à chegada da pluma de rejeitos (UFES, 2017).

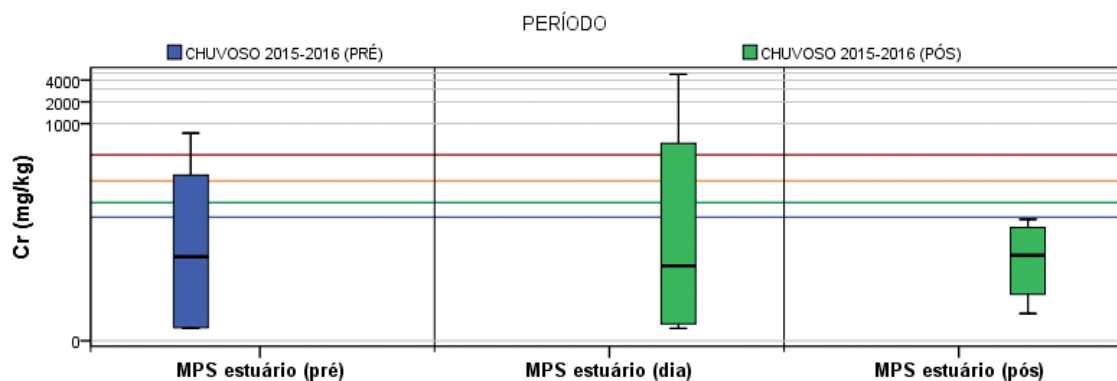


Figura 125 – Concentrações de cromo no ambiente estuarino, praia e oceano após a incidência da pluma de rejeitos na região (GOLDER, 2016).

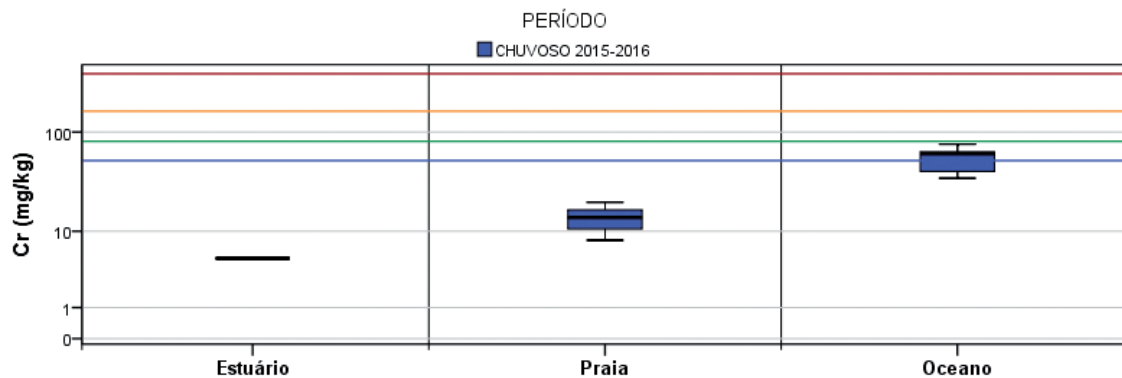
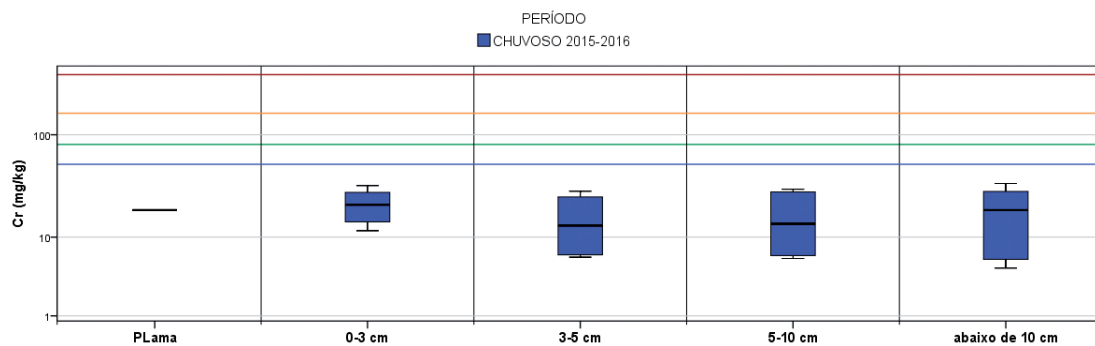


Figura 126 – Concentrações de cromo em secções de diferentes profundidades dos sedimentos do estuário e na lama de rejeitos (ROMERO, 2017).



Em estudos realizados na região próxima à foz do rio Doce em período anterior ao desastre, AGUIAR et al. (2014), PUPPIM (2014) e ECOLOGY (2013) verificaram a ocorrência de concentrações de Cr desde 1,1 até 66,8 mg/kg. Para a região da APA Costa das Algas, CPMAIS (2015), PORTOCEL (2010 e 2008), CTA (2009) e PETROBRAS (2007) obtiveram resultados similares aos observados para o entorno da foz do rio Doce, com valores de Cr entre 4 e 52 mg/kg.

Figura 127 – Distribuição espacial das medianas das concentrações de cromo nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017.

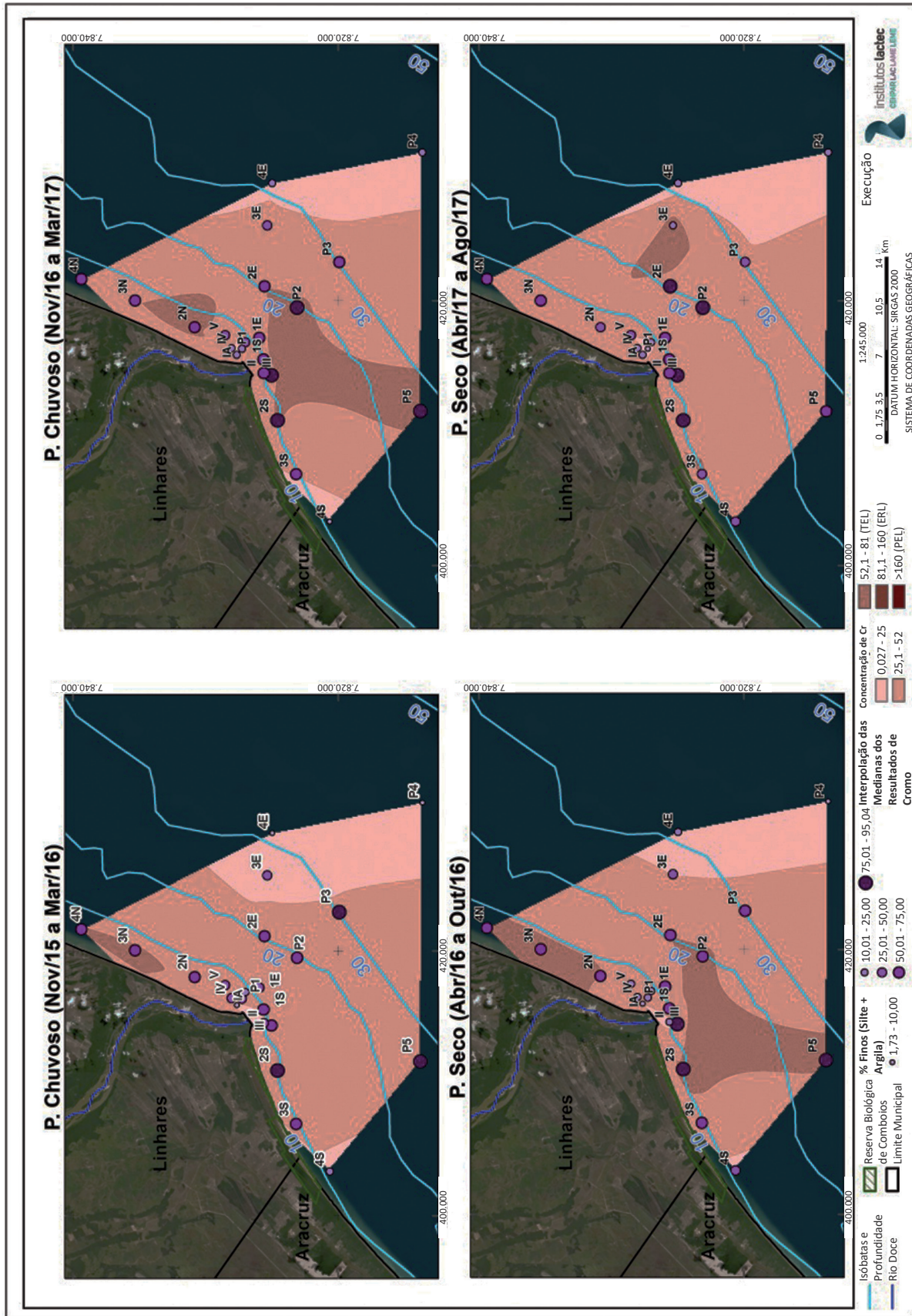


Figura 128 – Detalhe da distribuição espacial das medianas das concentrações de cromo na foz do rio Doce nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017.

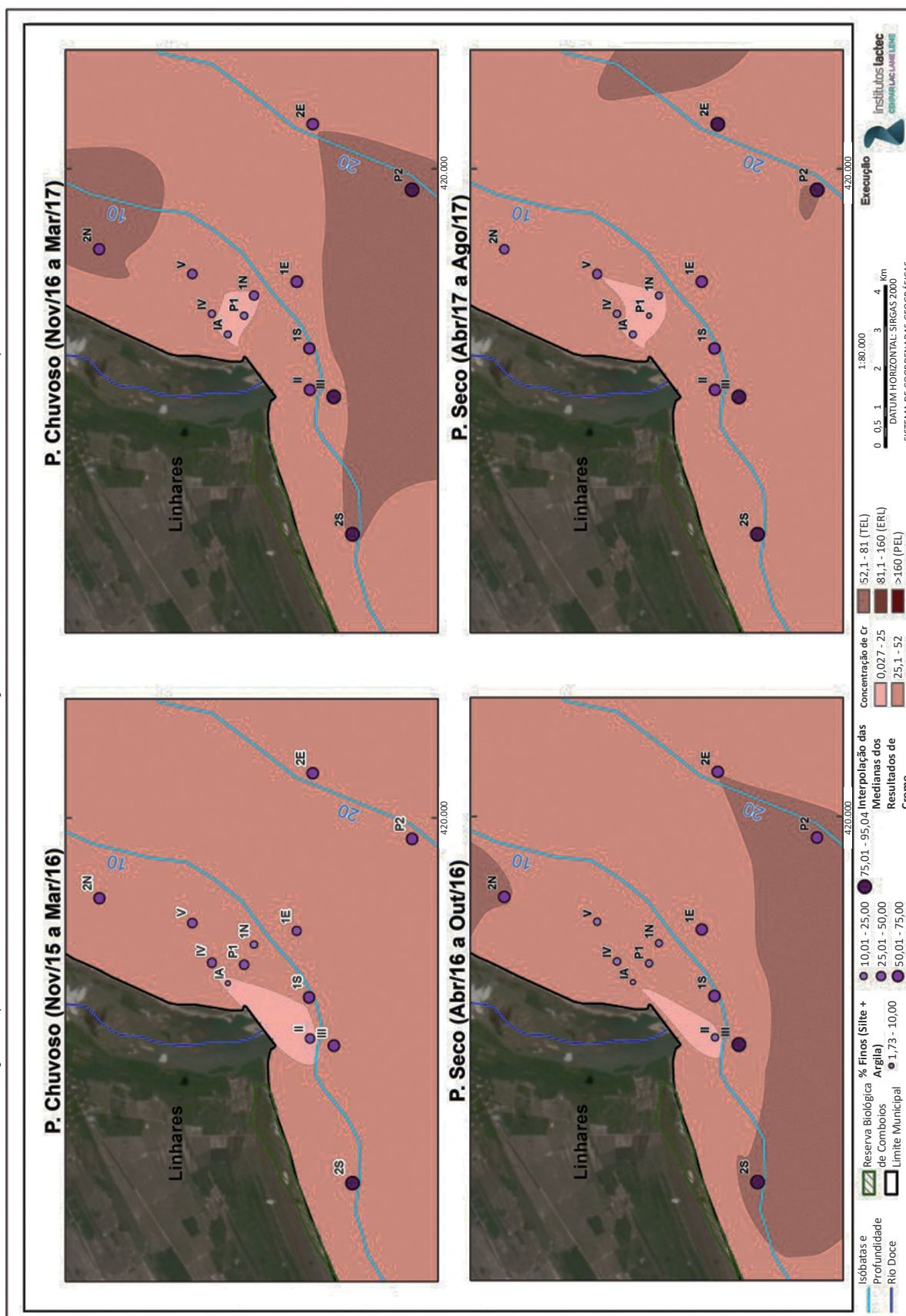
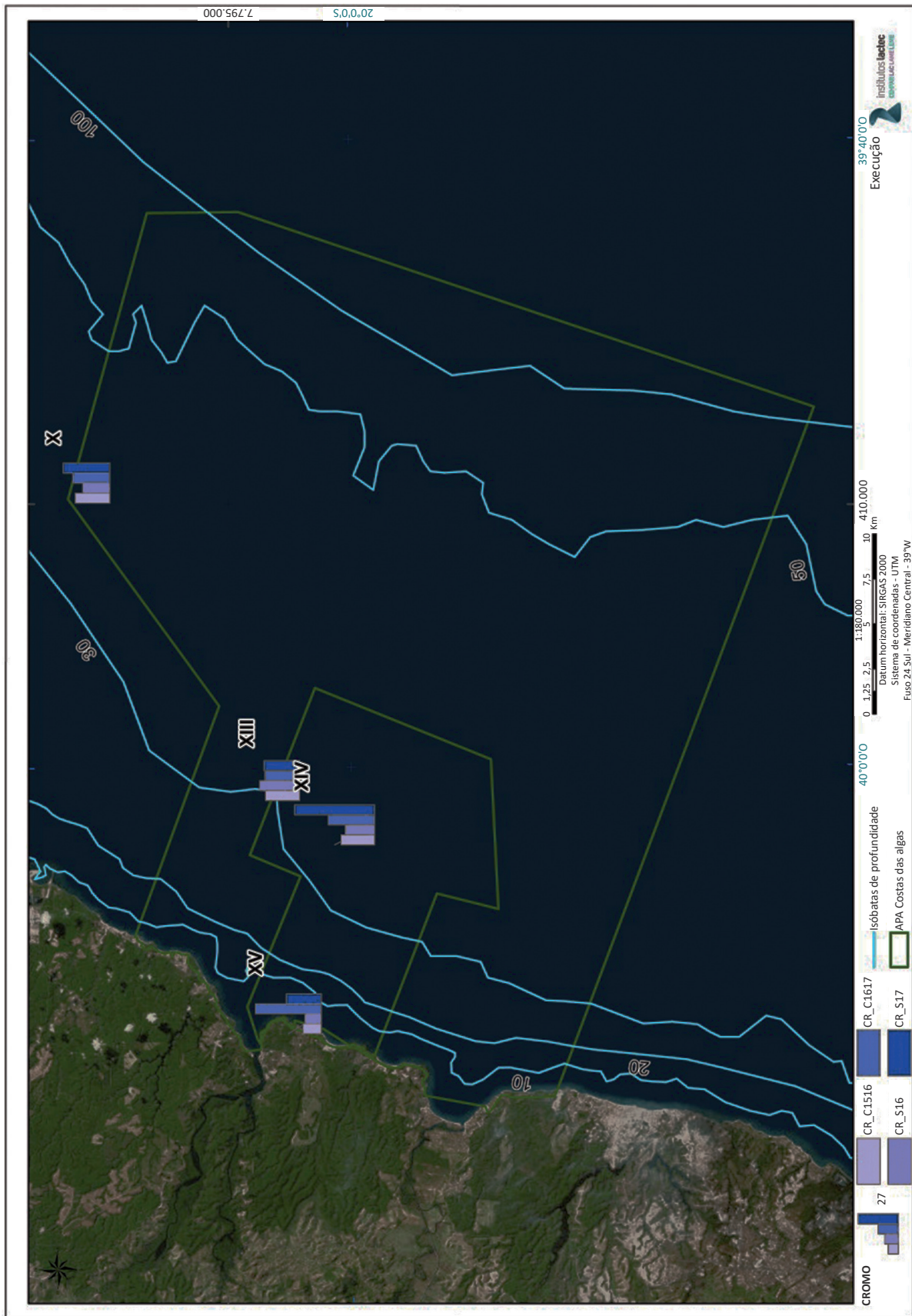


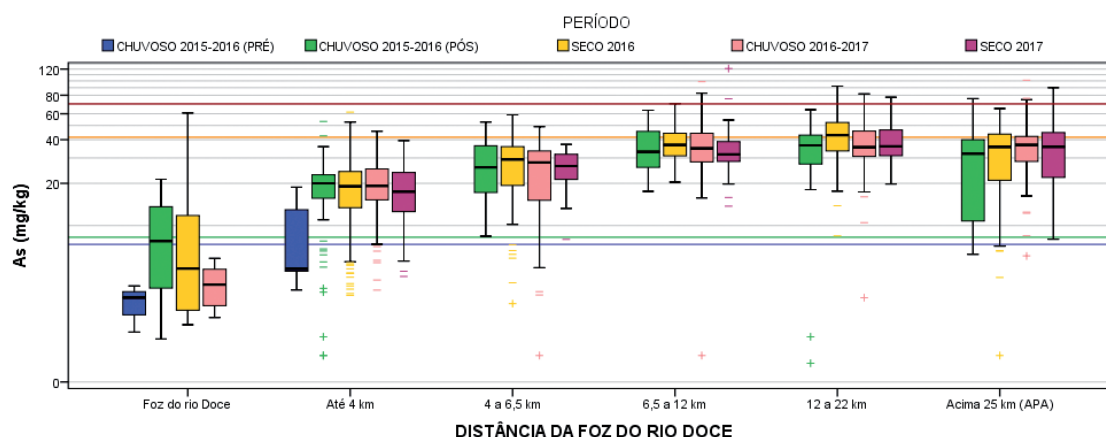
Figura 129 – Representação espacial das medianas das concentrações de ferro nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017 na região da Costa das Algas.



5.2.2.1.6 Arsênio (As)

As concentrações de As apresentaram uma tendência de aumento dos valores encontrados no sedimento em direção aos pontos localizados a maiores distâncias da foz do rio Doce, com resultados variando desde valores inferiores a 4 mg/kg na foz, durante o período anterior à chegada na região da pluma de rejeitos, a uma mediana de 43 mg/kg observada no período seco de 2016 em pontos localizados a uma distância de 12 a 22 km da foz, sendo este valor superior a PEL e indicativo de possíveis efeitos adversos à biota (Figura 130). Cabe ressaltar, no entanto, que níveis similares foram verificados nos pontos localizados na APA Costa das Algas, distante mais de 25 km da foz do rio Doce, o que indica fontes deste elemento não relacionadas diretamente com o aporte continental (Figura 133, Figura 134 e Figura 135). Concentrações de arsênio total em sedimentos marinhos e estuarinos não contaminados próximos à costa geralmente variaram na faixa de 5 a 15 mg/kg, no entanto, a concentração média de arsênio nos sedimentos marinhos profundos é de cerca de 40 mg/kg (NEFF, 2002).

Figura 130 – Diagrama de caixa das concentrações de arsênio nos conjuntos de pontos amostrados a diferentes distâncias da foz do rio Doce. Linha azul = nível de efeitos limiares (TEL); linha verde = nível de efeitos baixos (ERL); linha laranja = nível de efeitos prováveis (PEL); linha vermelha = nível de efeitos médios.



As concentrações de As verificadas no MPS da região estuarina da foz do rio Doce apresentou pouca variação entre o período anterior e posteriormente à chegada da pluma de rejeitos na região, com as concentrações em ambos os períodos se mantendo inferiores ao PEL (Figura 131, UFES, 2017). Já no estudo realizado por GOLDER (2016), verificou-se que as concentrações de As em sedimentos estuarinos e de praia, onde os valores se mantiveram inferiores ao TEL, diferiram fortemente das amostras coletadas no ambiente oceânico, onde as concentrações obtidas foram predominantemente superiores ao PEL (Figura 132). Estes resultados são condizentes com os obtidos por ECOLOGY (2013) em região próxima da foz do rio Doce, onde as concentrações de As mantiveram-se em torno de 30 mg/kg, e com os resultados da região da APA Costa das Algas apresentados por CPMAIS (2015), MIRLEAN et al. (2012), PORTOCEL (2010) e PETROBRAS (2007), onde as concentrações de As variaram em torno de 45 mg/kg, alcançando concentrações acima de 90 mg/kg.

Figura 131 – Concentrações de arsênio no material particulado em suspensão do ambiente estuarino em momento anterior e posterior à chegada da pluma de rejeitos (UFES, 2017).

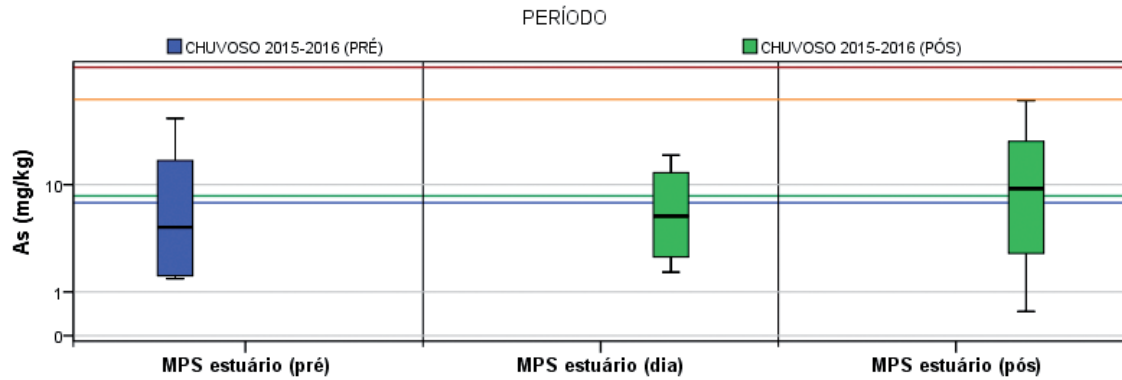


Figura 132 – Concentrações de arsênio no ambiente estuarino, praia e oceano após a incidência da pluma de rejeitos na região (GOLDER, 2016).

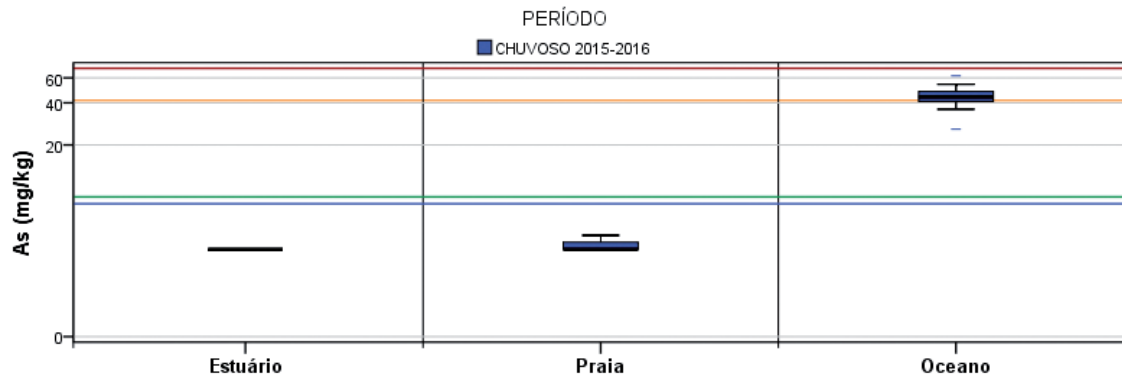


Figura 133 – Distribuição espacial das medianas das concentrações de arsênio nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017.

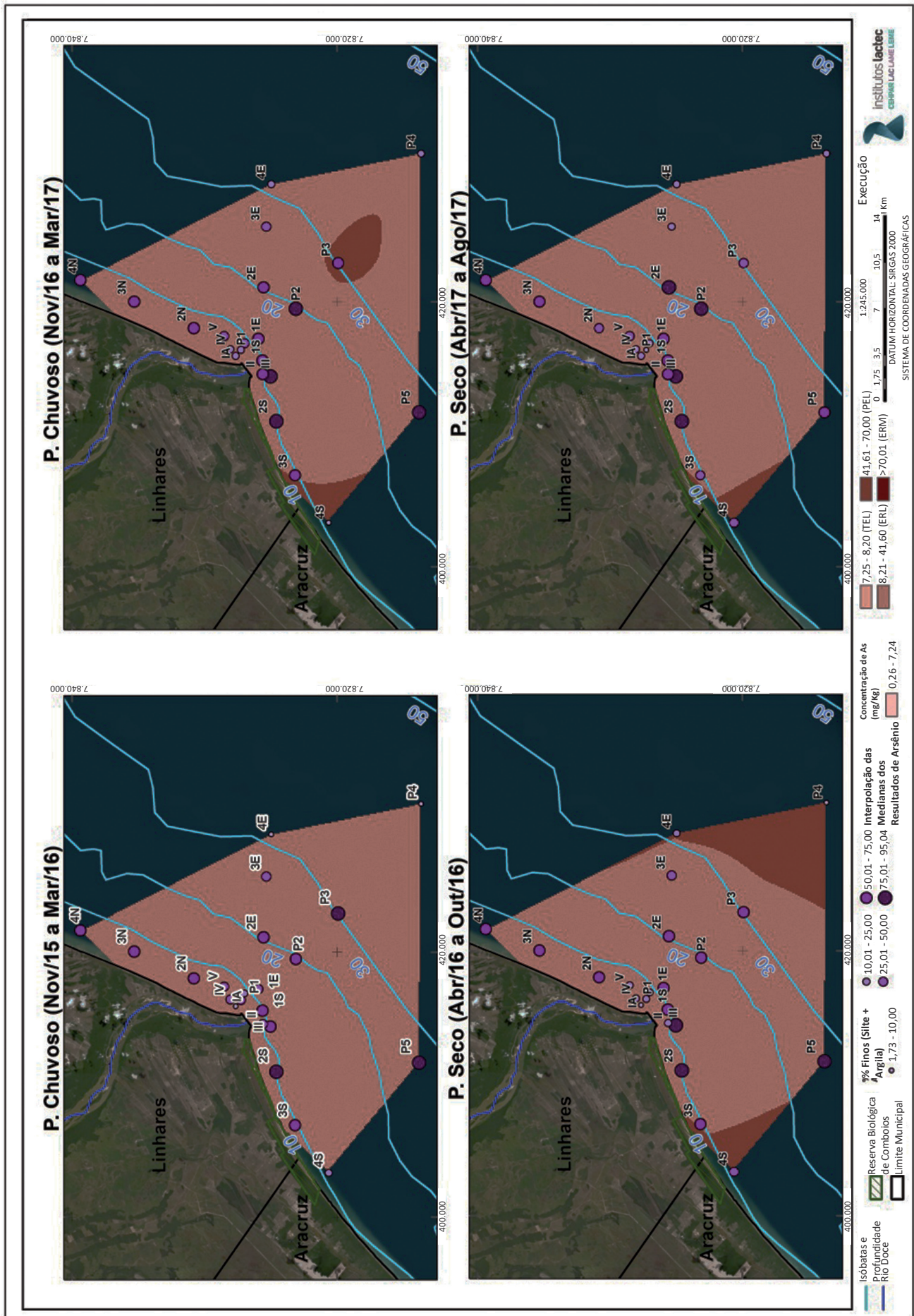


Figura 134 – Detalhe da distribuição espacial das medianas das concentrações de arsênio na foz do rio Doce nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017.

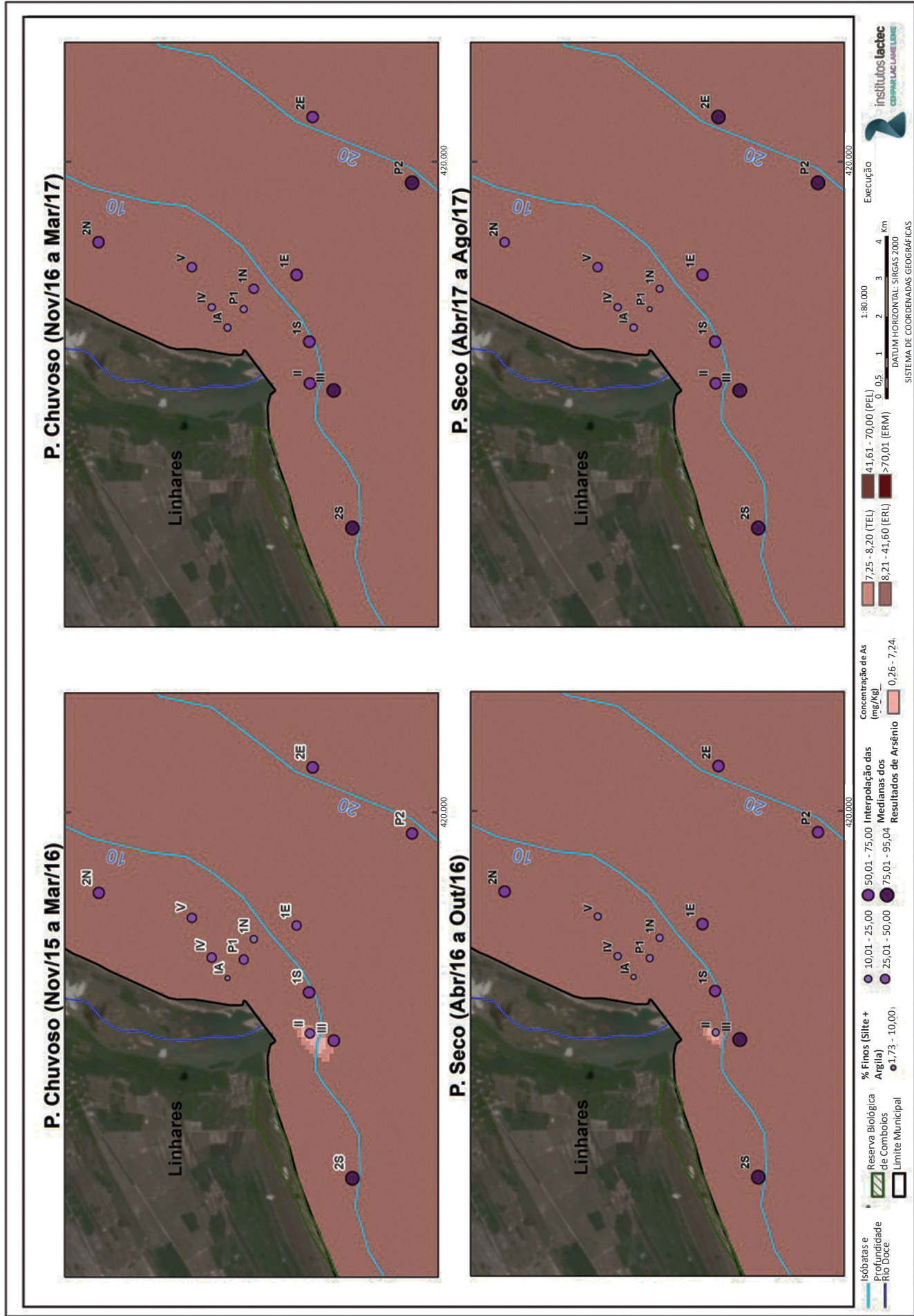
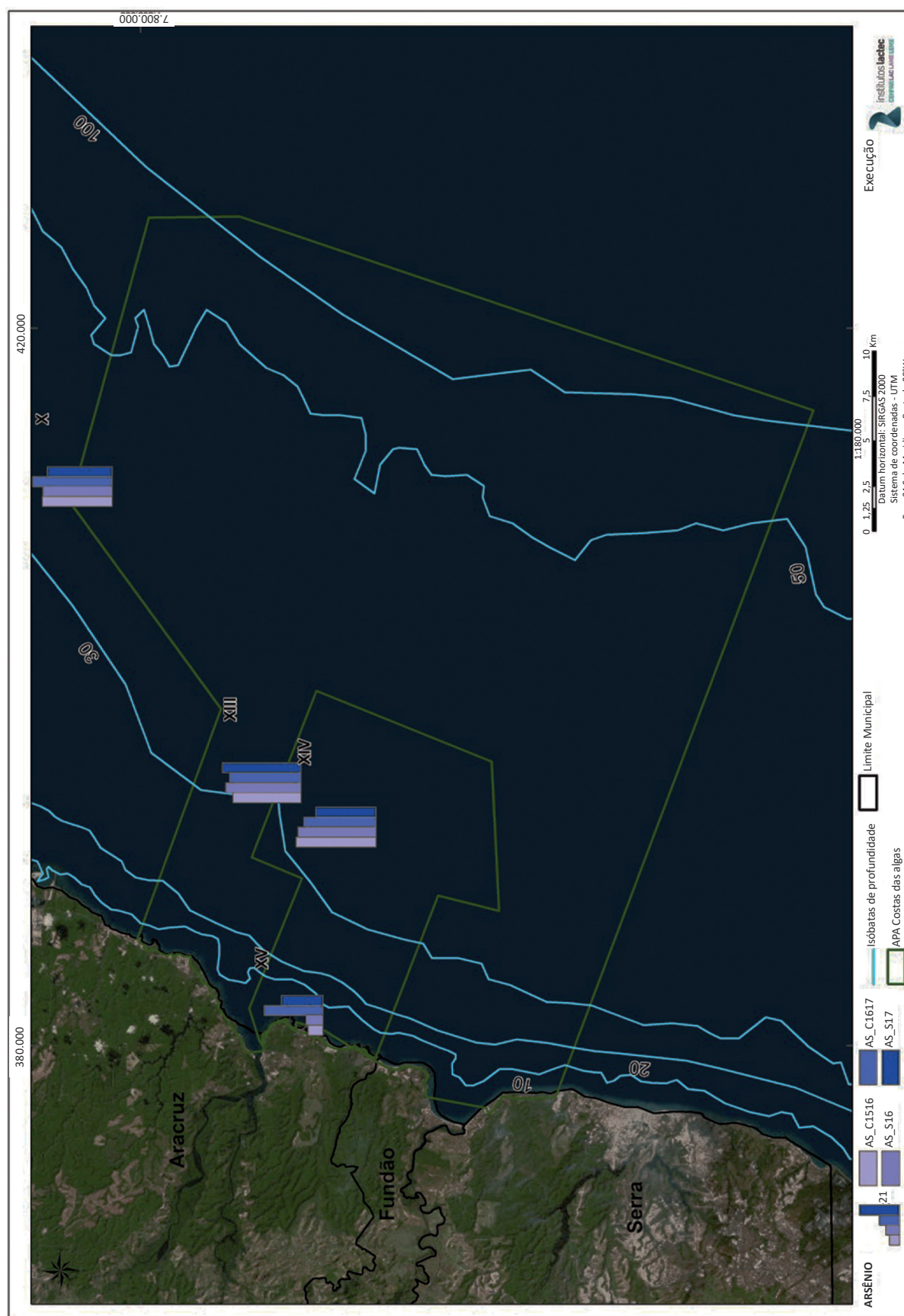


Figura 135 – Representação espacial das medianas das concentrações de arsênio nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017 na região da Costa das Algas.



5.2.2.1.7 Zinco (Zn)

As concentrações de Zn nos sedimentos da região monitorada apresentou maiores valores de mediana nos pontos localizados a uma distância de 4 a 6,5 km da foz do rio Doce, com as concentrações verificadas na foz do rio Doce em níveis similares aos encontrados na APA Costa da Algas (Figura 140, Figura 141 e Figura 142). Exceto por alguns valores pontuais, as concentrações de Zn verificadas na região se mantiveram em concentrações inferiores ao TEL, indicando a ausência de impactos à biota por este elemento (Figura 136).

Figura 136 – Diagrama de caixa das concentrações de zinco nos conjuntos de pontos amostrados a diferentes distâncias da foz do rio Doce. Linha azul = nível de efeitos limiars (TEL); linha verde = nível de efeitos baixos (ERL); linha laranja = nível de efeitos prováveis (PEL); linha vermelha = nível de efeitos médios.

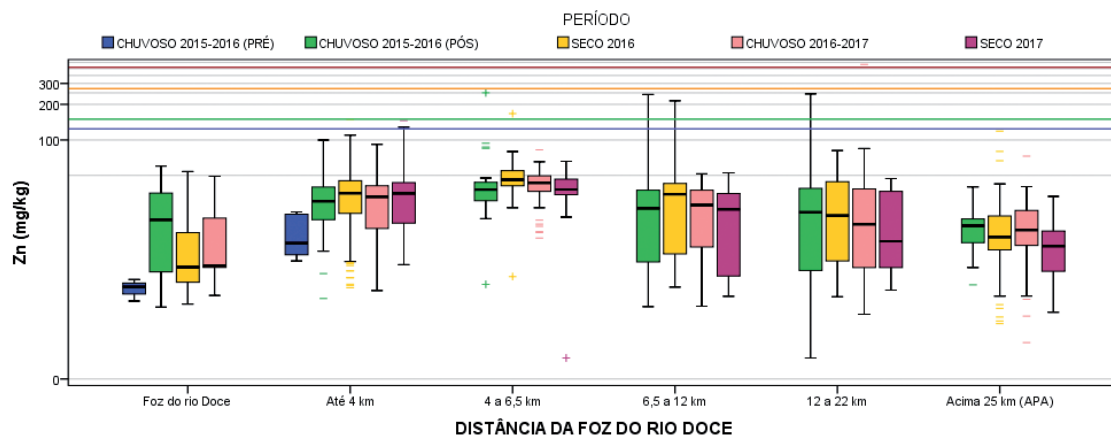


Figura 137 – Concentrações de zinco no material particulado em suspensão do ambiente estuarino em momento anterior e posterior à chegada da pluma de rejeitos (UFES, 2017).

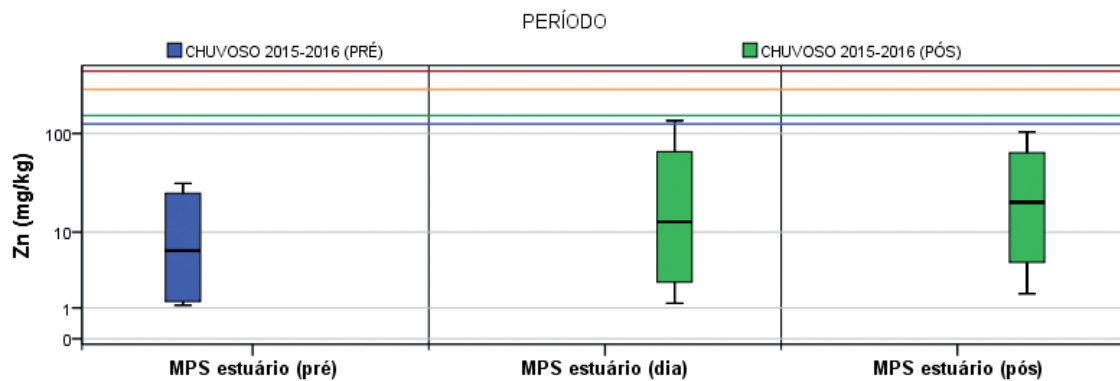


Figura 138 – Concentrações de zinco no ambiente estuarino, praia e oceano após a incidência da pluma de rejeitos na região (GOLDER, 2016).

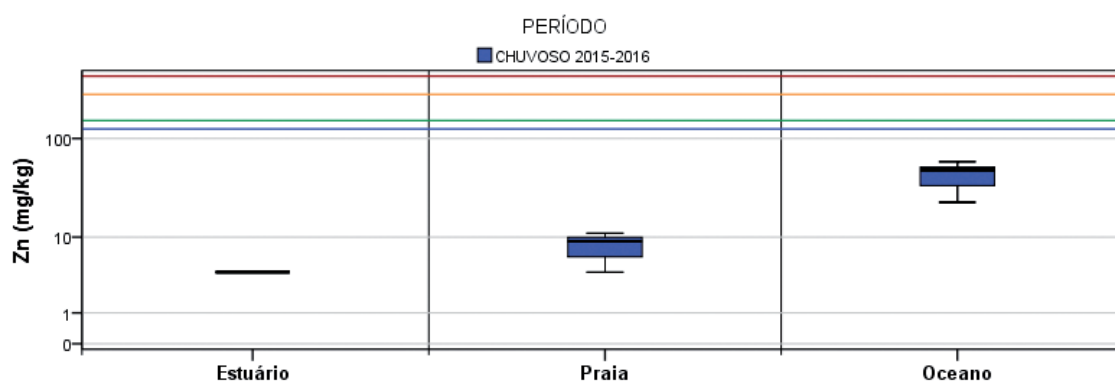
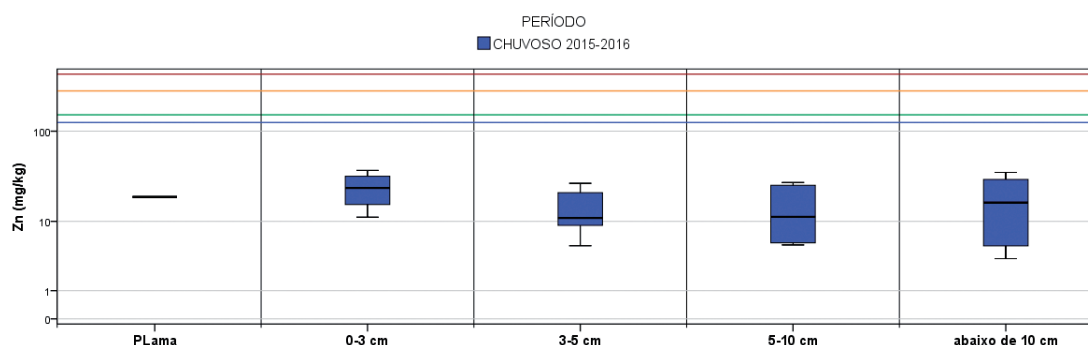


Figura 139 – Concentrações de zinco em secções de diferentes profundidades dos sedimentos do estuário e na lama de rejeitos (ROMERO, 2017).



Os resultados obtidos por UFES (2017), GOLDER (2016) e ROMERO (2017), Figura 137, Figura 138 e Figura 139, indicam uma pequena contribuição da pluma de rejeitos para as concentrações de Zn verificadas na região após o desastre, não indicando potenciais impactos ao meio ambiente, para este elemento. As concentrações de Zn verificados na região próxima da foz do rio Doce em estudos anteriores ao desastre (AGUIAR et al., 2014; PUPPIM, 2014 e ECOLOGY, 2013) apresentaram concentrações de até 58 mg/kg e até 32 mg/kg em estudo realizado na região da Costa das Algas (CPMAIS, 2015), níveis próximos aos observados no monitoramento marinho.

As concentrações de Zn nos sedimentos marinhos e estuarinos variam amplamente. As concentrações de Zn nos sedimentos superficiais da plataforma continental do sudeste dos Estados Unidos estão na faixa de 3 a 10 mg/kg, enquanto que as concentrações de Zn nos sedimentos superficiais de Georges Bank, na costa da Nova Inglaterra, variam de 1,2 a 71 mg/kg, com as maiores concentrações sendo associadas com os sedimentos de grãos mais finos. As concentrações de Zn podem ser altas em sedimentos não contaminados distantes de atividades humanas devido ao contexto geológico da região. A fração de sedimentos lamosos da Baía de Terra Nova, Antártida, contém 75 a 155 mg/kg de Zn. O Zn pode estar associado a partículas minerais pesadas naturais nos sedimentos. Uma grande fração do Zn em sedimentos contaminados e não contaminados pode ser residual (parte da rede mineral de partículas de sedimentos ou presente em minerais pesados), tornando-a não biodisponível. O Zn residual pode estar associado com a rede mineral de argilas ou com uma variedade de minerais pesados (NEFF, 2002).

Figura 140 – Distribuição espacial das medianas das concentrações de zinco nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017.

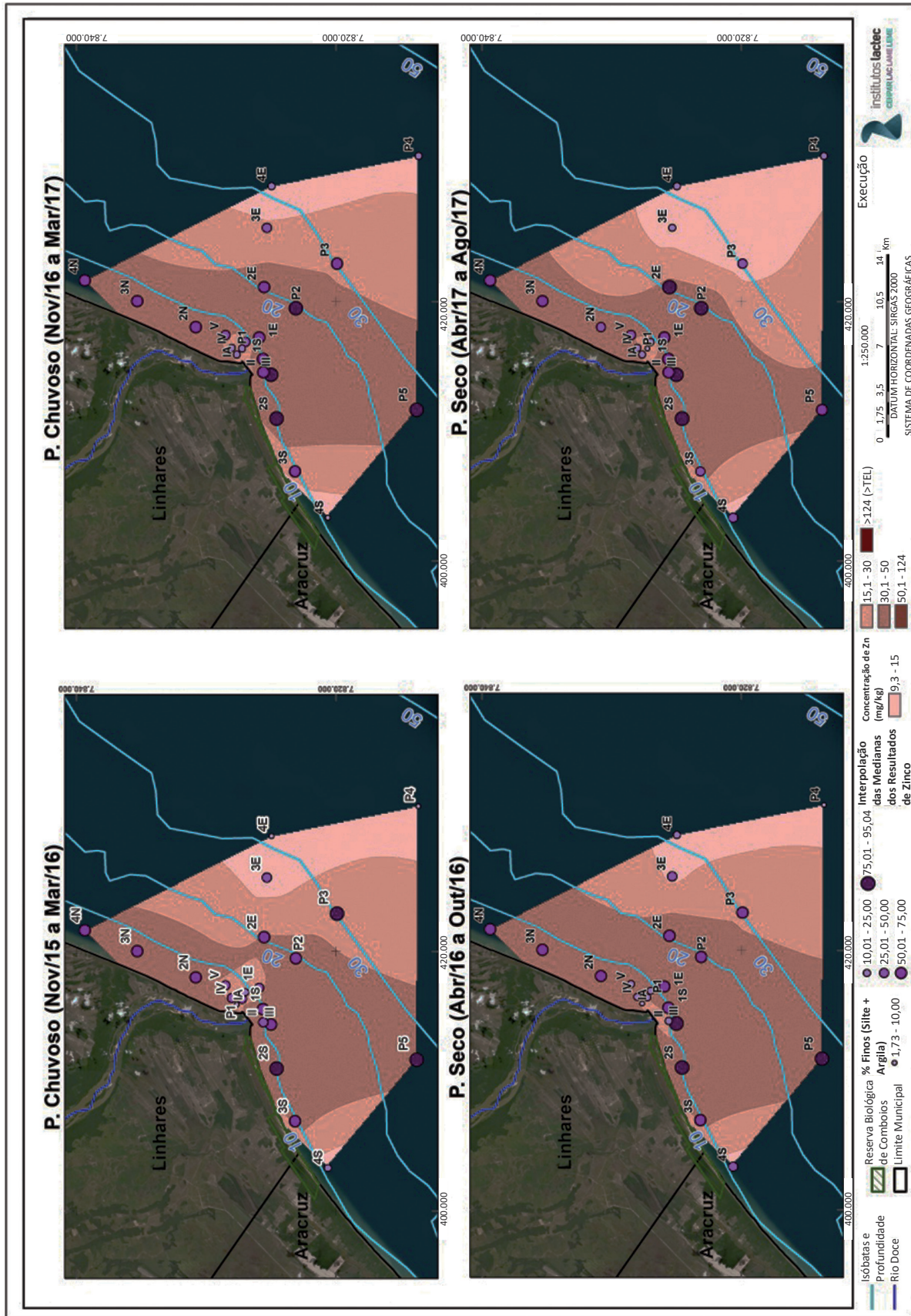


Figura 141 – Detalhe da distribuição espacial das medianas das concentrações de zinco na foz do rio Doce nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017.

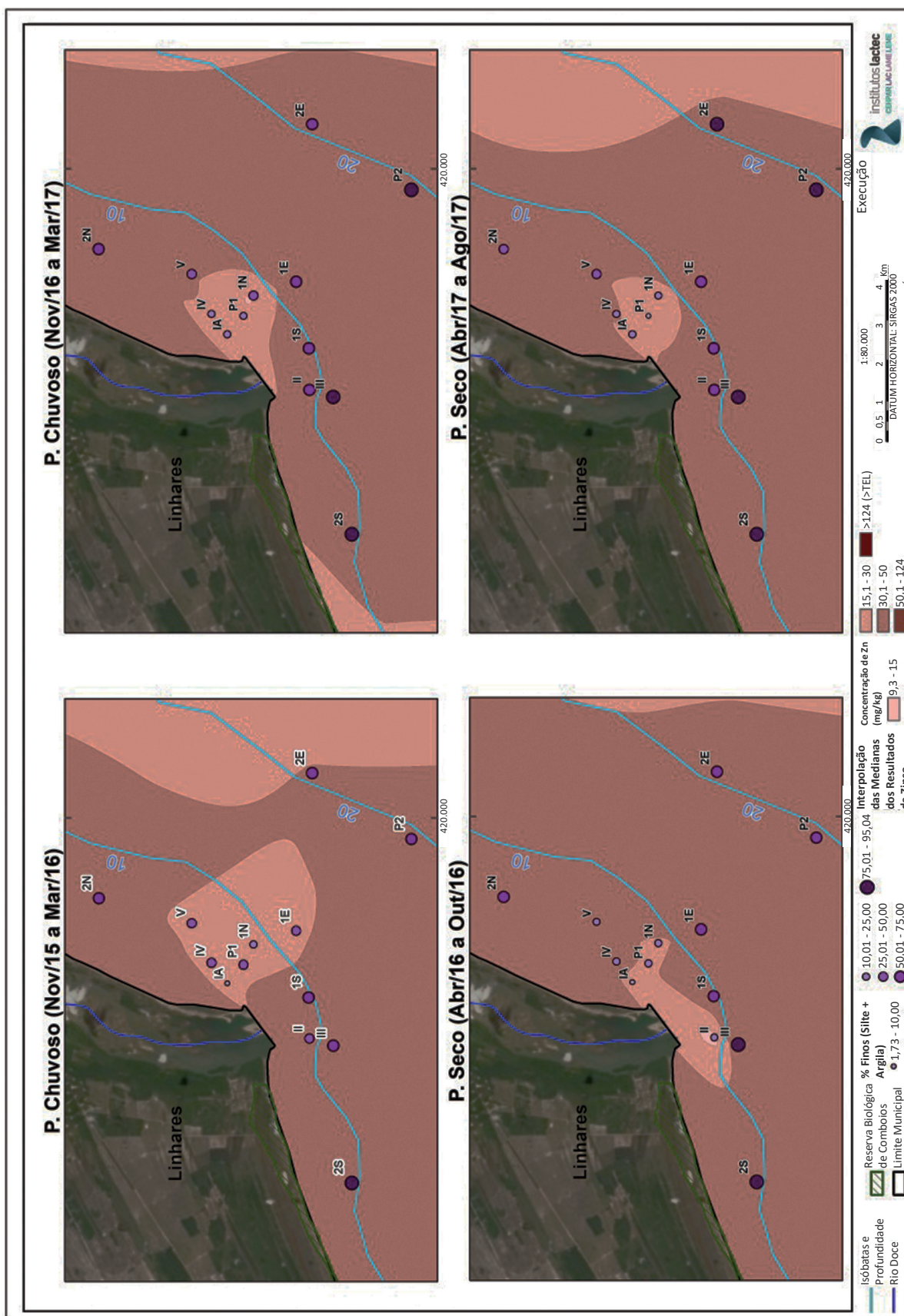
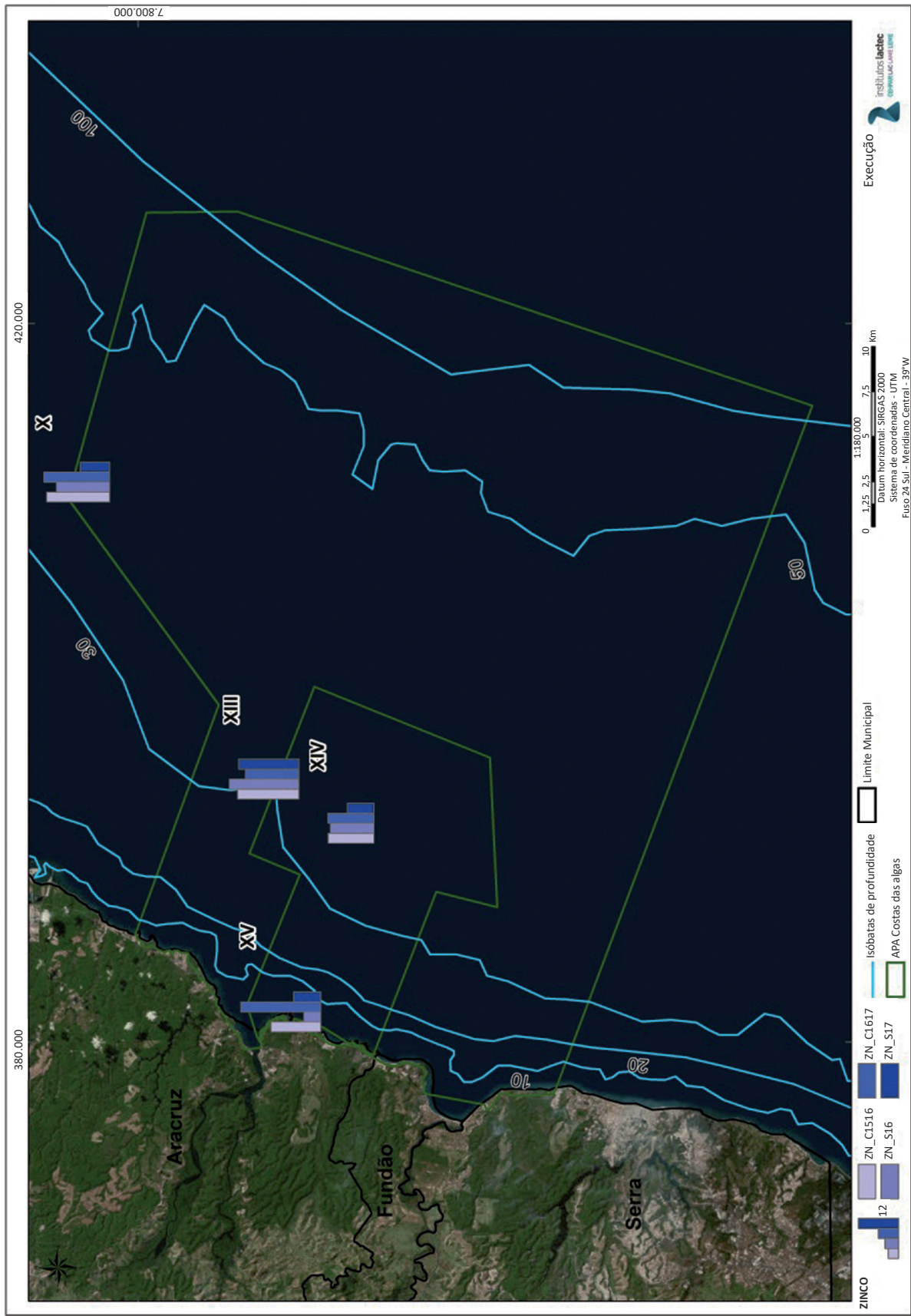


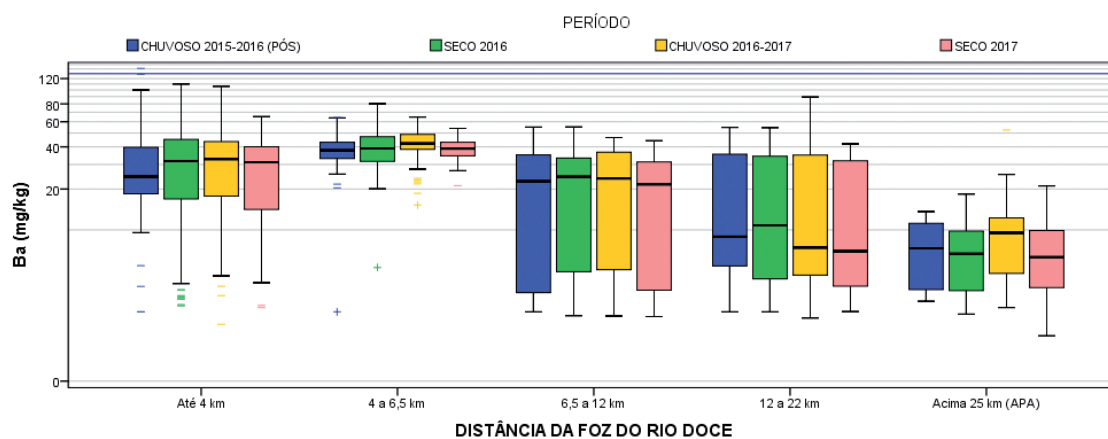
Figura 142 – Representação espacial das medianas das concentrações de zinco nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017 na região da Costa das Algas.



5.2.2.1.8 Bário (Ba)

As maiores concentrações de Ba foram verificadas em pontos localizados desde distâncias inferiores a 4 km da foz até 6,5 km, onde as medianas alcançaram valores superiores a 30 mg/kg, enquanto que as menores medianas foram obtidas na APA Costa das Algas, em valores inferiores a 10 mg/kg (Figura 145, Figura 146 e Figura 147). As maiores concentrações de Ba em regiões mais próximas da foz do rio Doce indicam para contribuições deste elemento oriundas da plataforma continental. No entanto, exceto por valores atípicos considerados como *outliers*, todos os resultados obtidos para Ba mantiveram-se abaixo do valor de TEL, indicando uma baixa influência do Ba sobre a qualidade ambiental da região (Figura 143).

Figura 143 – Diagrama de caixa das concentrações de bário nos conjuntos de pontos amostrados a diferentes distâncias da foz do rio Doce. Linha azul = nível de efeitos limiares (TEL).



O bário é o décimo quarto elemento mais abundante na crosta continental da Terra, com uma concentração média em solos e sedimentos de cerca de 400 mg/kg e um intervalo de valores inferiores a 1 mg/kg a 2.000 mg/kg. Os rios contribuem com quantidades substanciais de bário dissolvido e particulado para os oceanos e águas costeiras. A diminuição da concentração de bário nas águas oceânicas ao largo da foz do estuário, sem dúvida, é causada pela precipitação de barita na água do mar com alto teor de sulfato e reabsorção de algum bário dissolvido em partículas de argila suspensas (NEFF, 2002). Apesar da influência continental verificada sobre as concentrações de Ba, os resultados obtidos por GOLDER (2016) indicam para maiores concentrações observadas em amostras oceânicas, no entanto este resultado está provavelmente relacionado com diferenças nas características granulométricas entre as amostras desta região e as amostras de estuário e de praia (Figura 144). O estudo realizado próximo à foz do rio Doce por AGUIAR et al. (2014) obteve concentração de Ba de 134 mg/kg, enquanto que PETROBRAS (2007), em estudo realizado na região da APA Costa das Algas, obteve concentrações de Ba de 7,1 e 8,5 mg/kg, reforçando a variabilidade entre amostras próximas e distantes da foz do rio Doce verificadas no presente monitoramento.

Figura 144 – Concentrações de bário no ambiente estuarino, praia e oceano após a incidência da pluma de rejeitos na região (GOLDER, 2016).

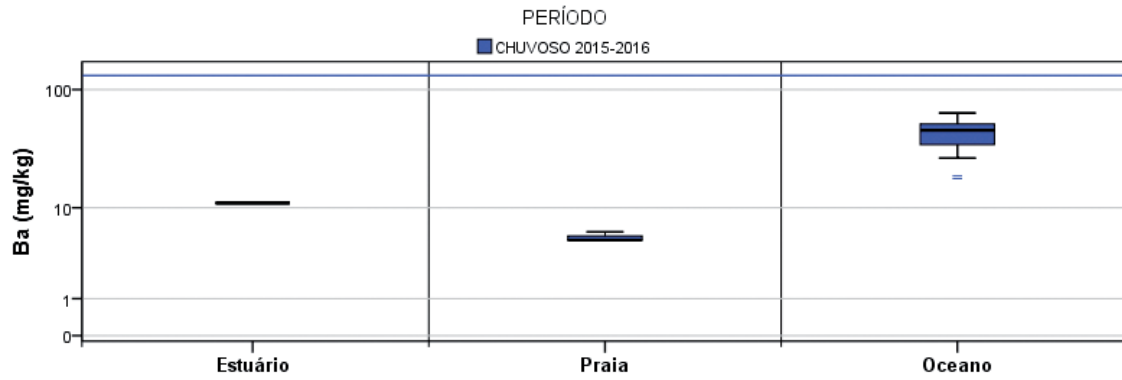


Figura 145 – Distribuição espacial das medianas das concentrações de bário nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017.

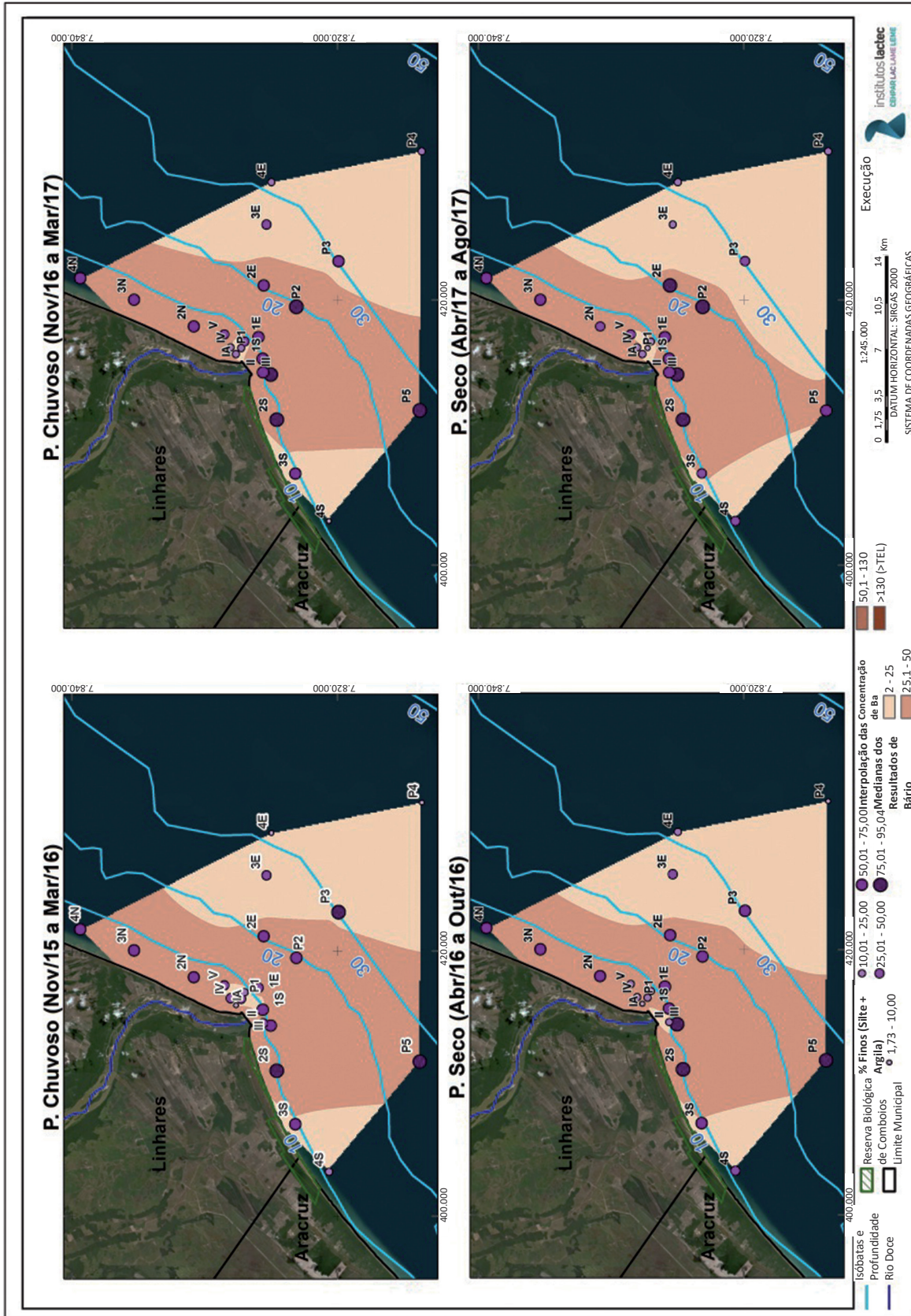


Figura 146 – Detalhe da distribuição espacial das medianas das concentrações de bário na foz do rio Doce nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017.

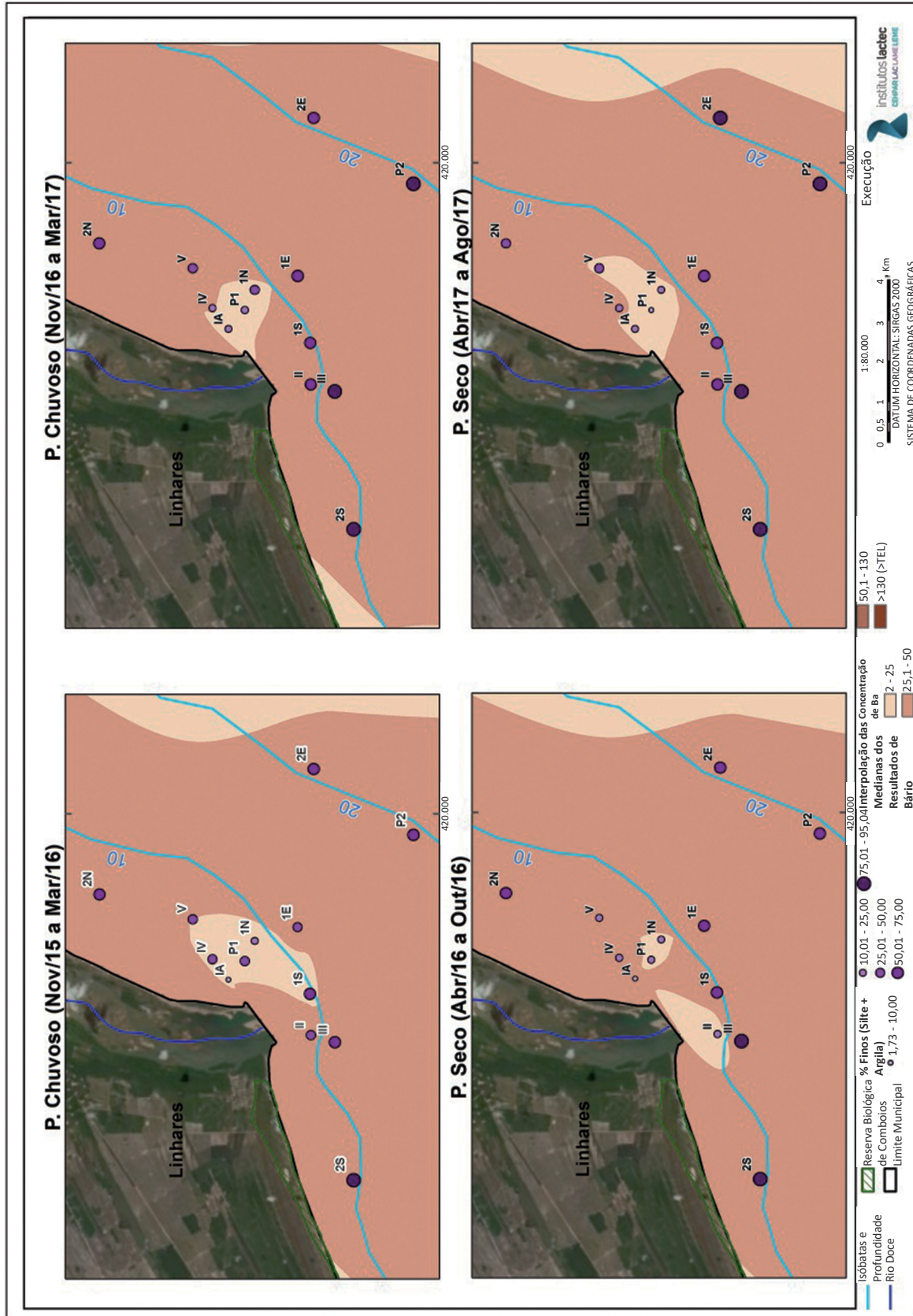
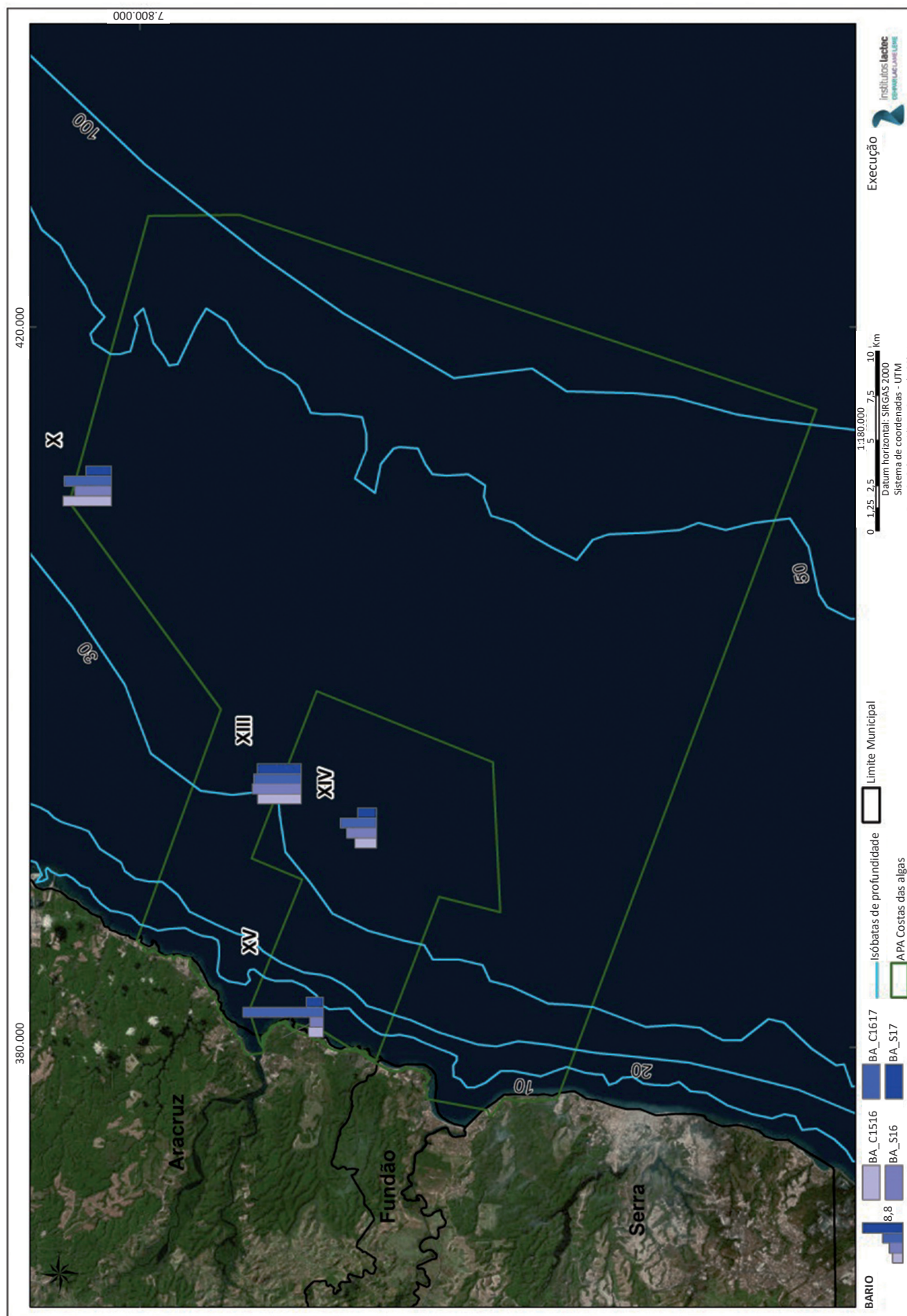


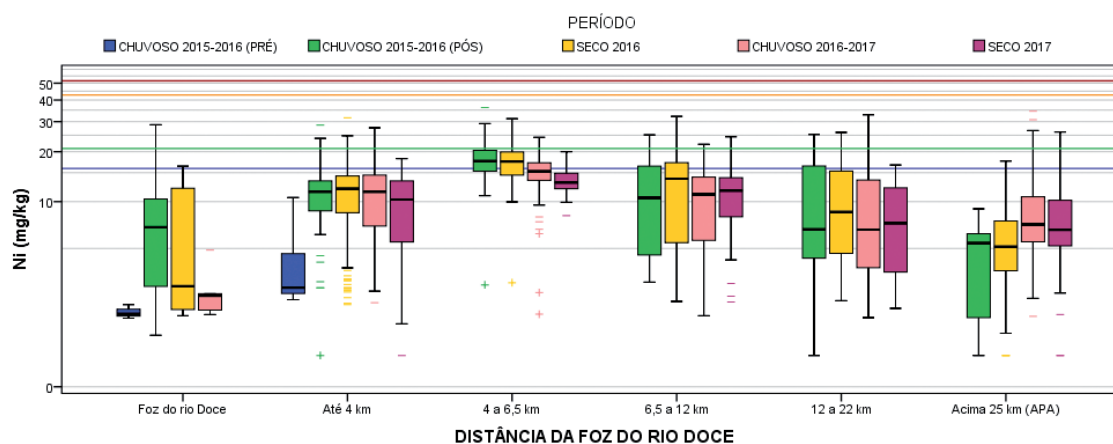
Figura 147 – Representação espacial das medianas das concentrações de bário nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017 na região da Costa das Algas.



5.2.2.1.9 Níquel (Ni)

As concentrações de Ni observadas foram maiores em pontos localizados a distâncias entre 4 e 6,5 km da foz do rio Doce (Figura 152, Figura 153 e Figura 154), sendo verificado nos períodos chuvoso de 2015-2016 e seco de 2016 medianas em valores intermediários a TEL e ERL (Figura 148). Menores medianas foram observadas em amostras do período anterior à chegada da pluma de rejeitos (foz e pontos até 4 km de distância) e no período chuvoso de 2016-2017 (foz do rio Doce). Tendo em vista o grande predomínio de resultados inferiores a ERL e TEL, não se observa indícios de prejuízos à biota da região relacionados com as concentrações de Ni no sedimento.

Figura 148 – Diagrama de caixa das concentrações de níquel nos conjuntos de pontos amostrados a diferentes distâncias da foz do rio Doce. Linha azul = nível de efeitos limiars (TEL); linha verde = nível de efeitos baixos (ERL); linha laranja = nível de efeitos prováveis (PEL); linha vermelha = nível de efeitos médios.



Os resultados obtidos por UFES (2017) e por ROMERO (2017) em amostras de MPS e de sedimentos estuarinos estratificados (Figura 149, Figura 150 e Figura 151), respectivamente, indicam uma possível contribuição dos rejeitos provenientes do rompimento da barragem do Fundão no aumento das concentrações de Ni da região. No entanto, este eventual aumento não se mostrou com potencial de impactar o meio ambiente.

Figura 149 – Concentrações de níquel no material particulado em suspensão do ambiente estuarino em momento anterior e posterior à chegada da pluma de rejeitos (UFES, 2017).

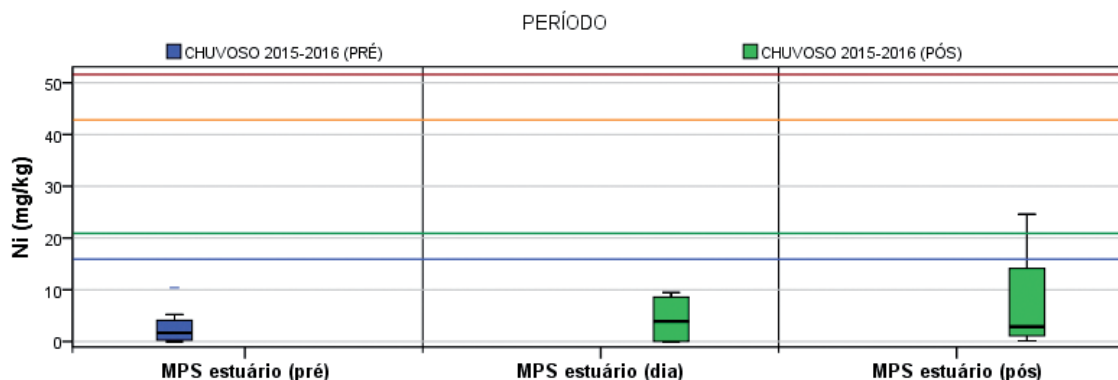


Figura 150 – Concentrações de níquel no ambiente estuarino, praia e oceano após a incidência da pluma de rejeitos na região (GOLDER, 2016).

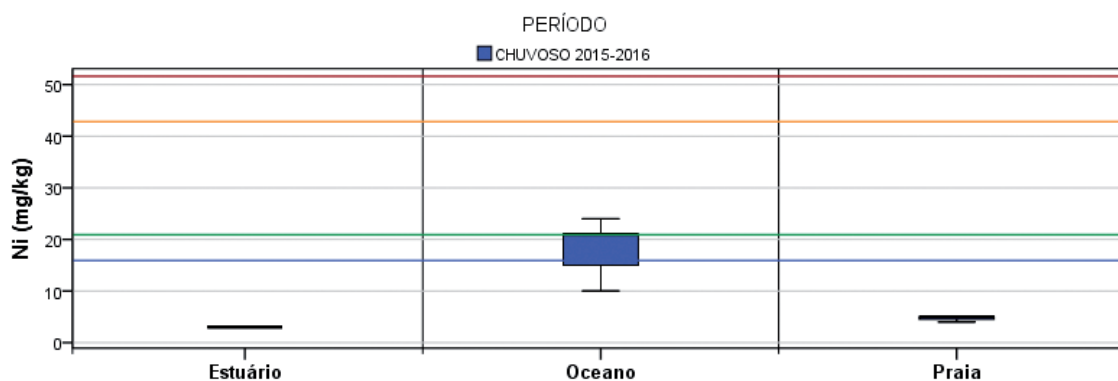


Figura 151 – Concentrações de níquel em seções de diferentes profundidades dos sedimentos do estuário e na lama de rejeitos (ROMERO, 2017).

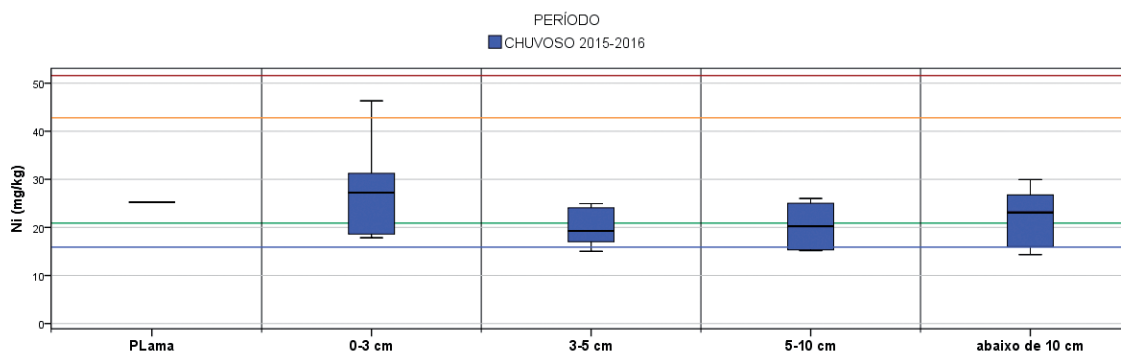


Figura 152 – Distribuição espacial das medianas das concentrações de níquel nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017.

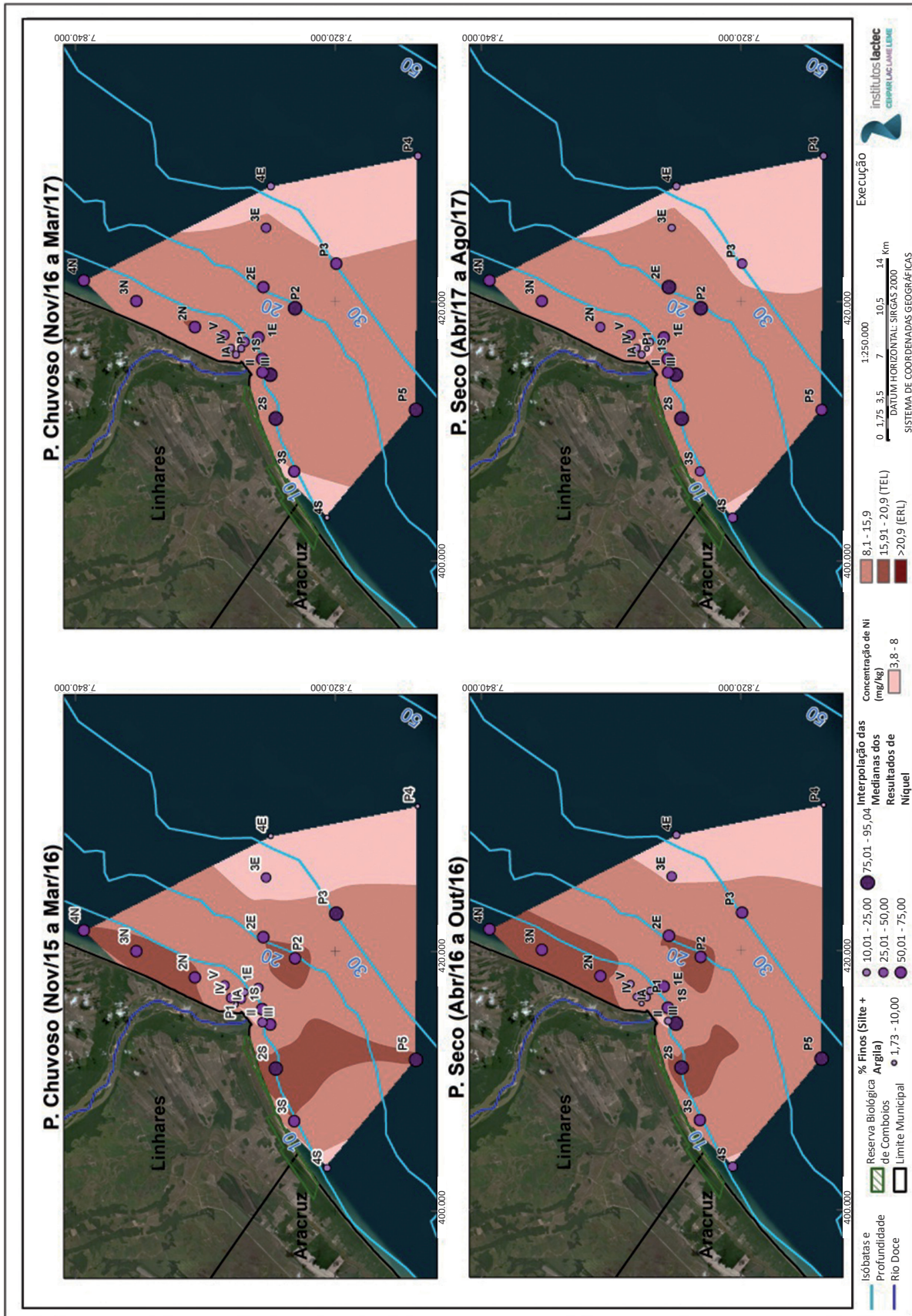


Figura 153 – Detalhe da distribuição espacial das medianas das concentrações de níquel na foz do rio Doce nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017.

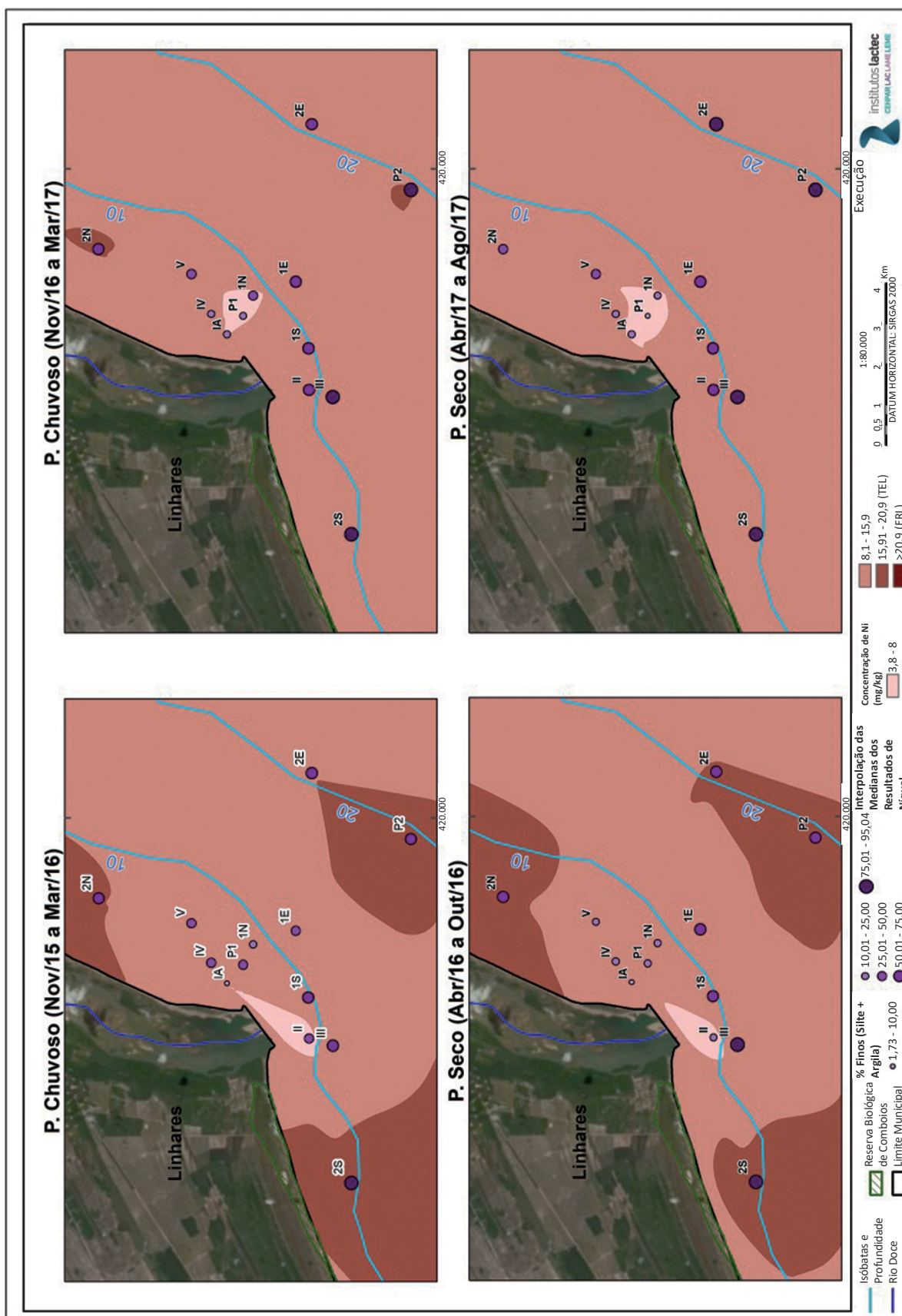
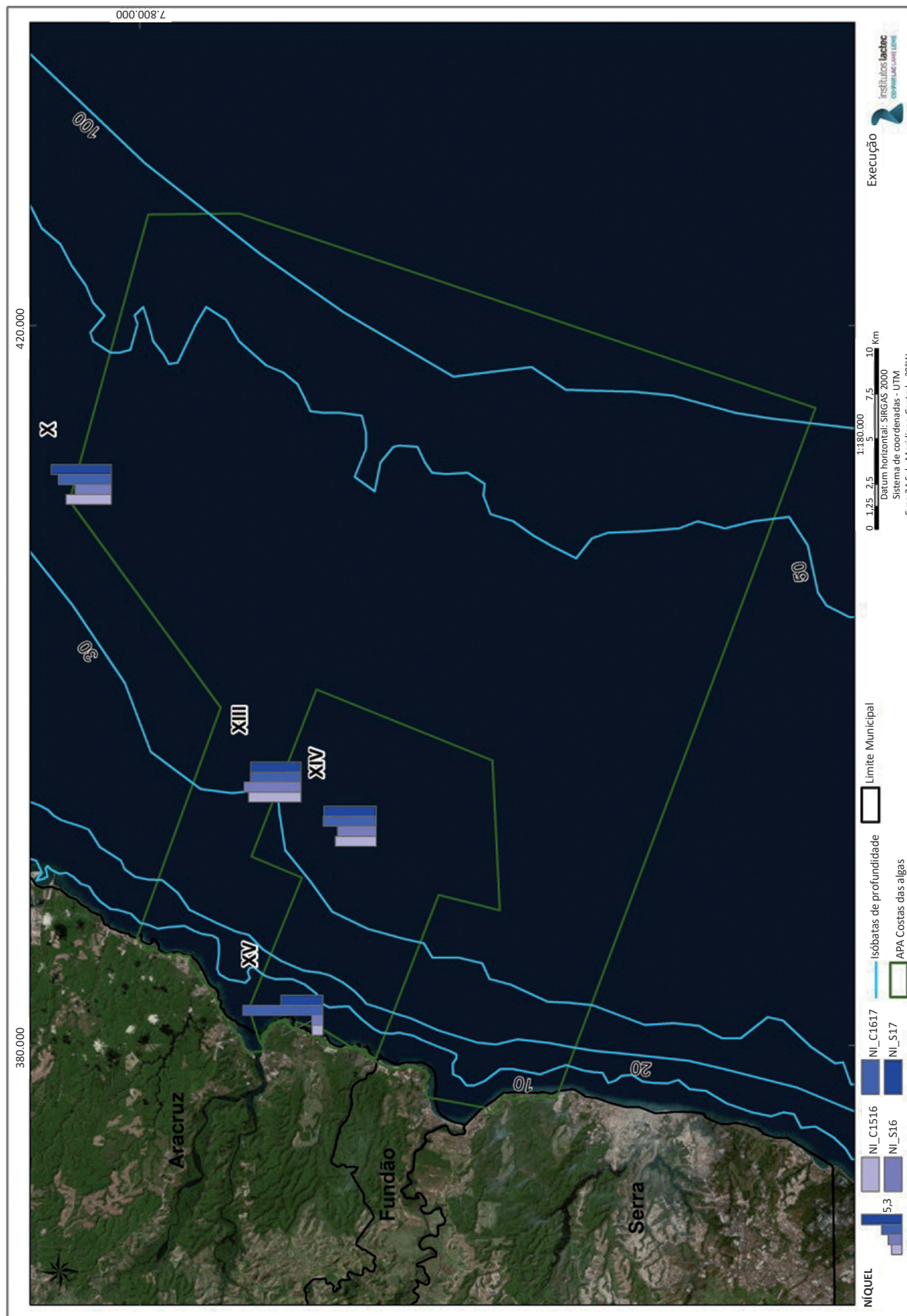


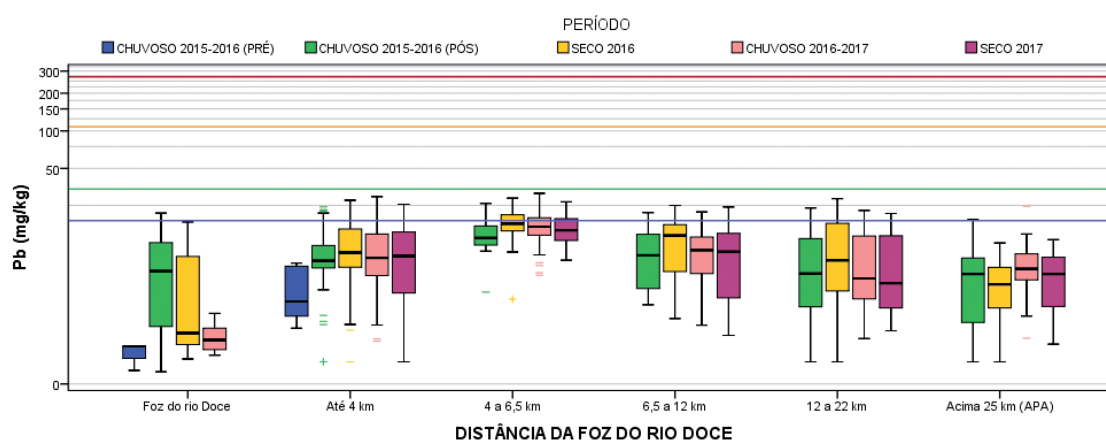
Figura 154 – Representação espacial das medianas das concentrações de níquel nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017 na região da Costa das Algas.



5.2.2.1.10 Chumbo (Pb)

As concentrações de Pb se mostraram mais elevadas em amostras de distâncias entre 4 e 6,5 km da foz do rio Doce, enquanto que as menores concentrações foram obtidas na foz do rio Doce no período anterior à chegada da pluma de rejeitos e no período chuvoso de 2016-2017 (Figura 158, Figura 159 e Figura 160). Todas as medianas apresentaram valores inferiores ao TEL, indicando níveis de Pb com baixa probabilidade de causar efeitos adversos ao ambiente da região (Figura 155).

Figura 155 – Diagrama de caixa das concentrações de zinco nos conjuntos de pontos amostrados a diferentes distâncias da foz do rio Doce. Linha azul = nível de efeitos limiares (TEL); linha verde = nível de efeitos baixos (ERL); linha laranja = nível de efeitos prováveis (PEL); linha vermelha = nível de efeitos médios.



Concentrações de chumbo total em sedimentos marinhos não contaminados e próximos da costa geralmente se encontram na faixa de 5 a 30 mg/kg. Os sedimentos da baía de Terra Nova, na Antártica, contêm $20,7 \pm 2,8$ mg/kg de chumbo. Sedimentos de águas costeiras e estuários próximos a fontes industriais e domésticas podem conter altas concentrações de chumbo (até 2.900 mg/kg). O chumbo residual em sedimentos não contaminados, que pode representar até 80% do chumbo total nos sedimentos, está associado principalmente a aluminossilicatos, minerais sulfetados e barita. Em sedimentos marinhos e estuarinos não contaminados, existe uma boa correlação entre as concentrações de alumínio ou ferro e chumbo, refletindo a associação de chumbo sedimentado com argila. Em sedimentos contaminados, a concentração de chumbo é maior do que a prevista pela regressão chumbo/alumínio ou chumbo/ferro (NEFF, 2002).

Os resultados obtidos por ROMERO (2017) em amostras estratificadas de sedimentos estuarinos e de amostras do sedimento oriundo da pluma de rejeitos depositada próximo à foz do rio Doce (Figura 157) indicam para baixas contribuições do aporte de rejeitos para o aumento das concentrações de Pb, da mesma forma que verificado por GOLDBERGER (2016) em amostras de sedimento estuarino, de praia e oceânico (Figura 156). Concentrações de Pb obtidas em amostras da região da APA Costa das ALGAS (CPMAIS, 2015) e próximo à foz do rio Doce (AGUIAR et al., 2014 e ECOLOGY, 2013) apresentaram concentrações de até 12 mg/kg, nível similar aos verificados nestes estudos e no monitoramento ambiental.

Figura 156 – Concentrações de chumbo no ambiente estuarino, praia e oceano após a incidência da pluma de rejeitos na região (GOLDER, 2016).

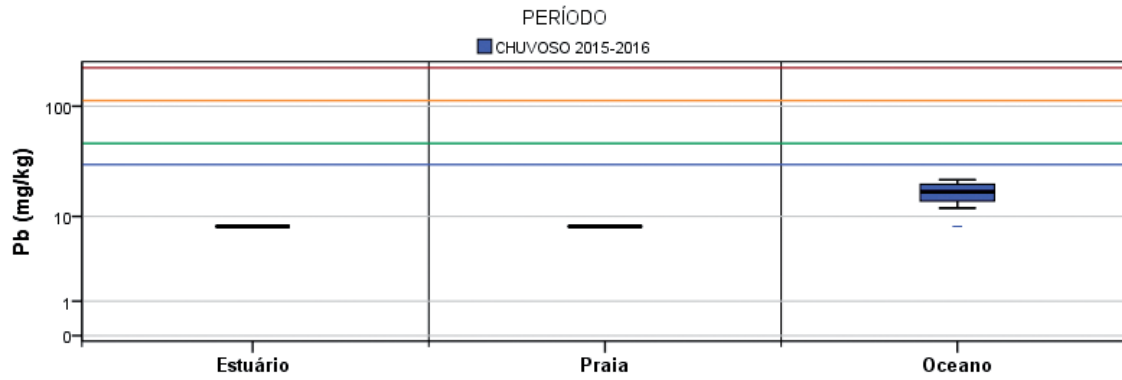


Figura 157 – Concentrações de chumbo em secções de diferentes profundidades dos sedimentos do estuário e na lama de rejeitos (ROMERO, 2017).

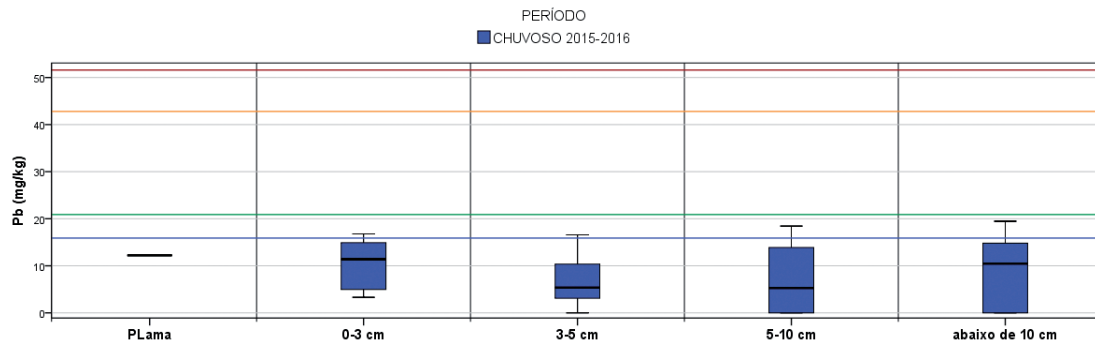


Figura 158 – Distribuição espacial das medianas das concentrações de chumbo nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017.

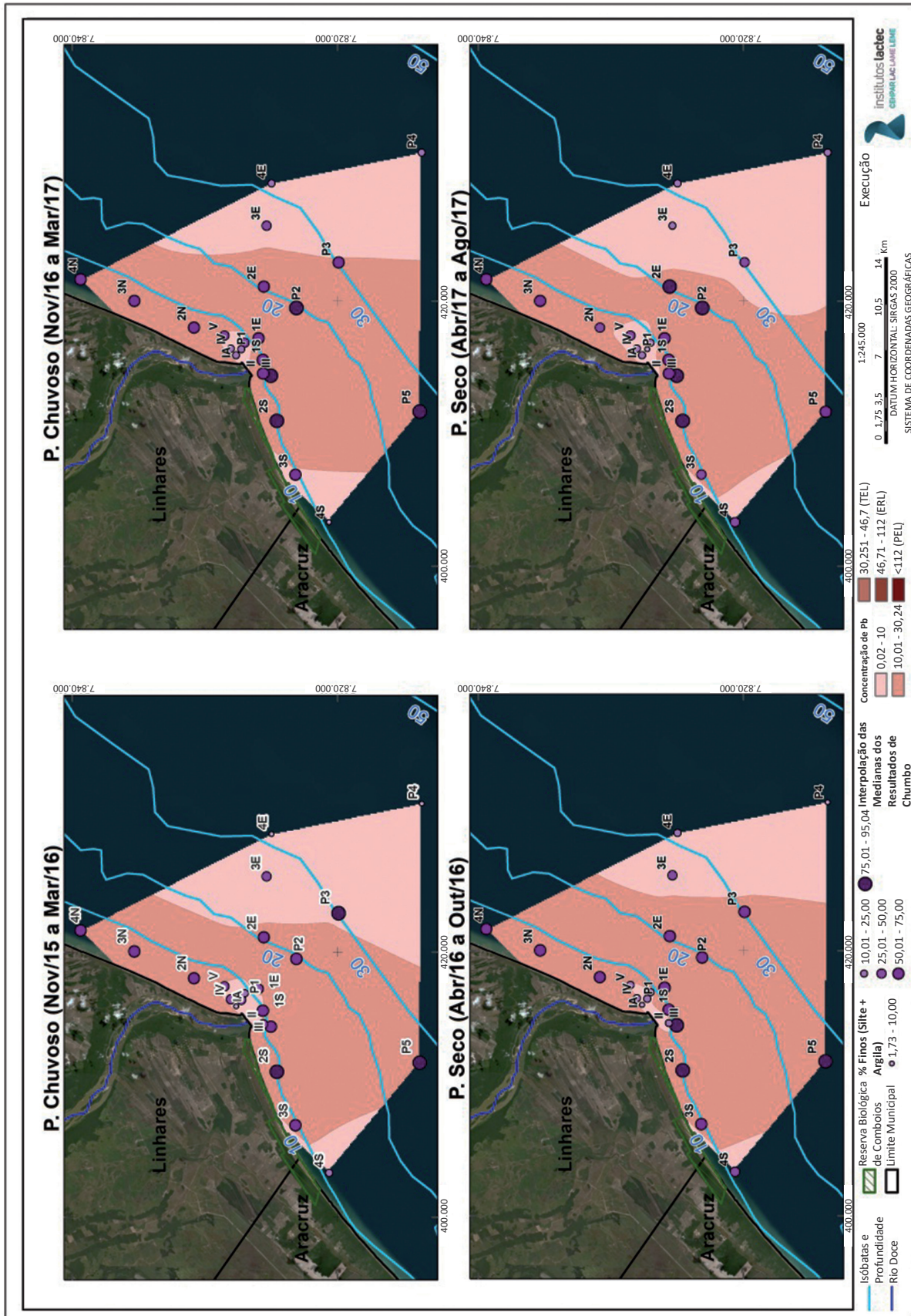


Figura 159 – Detalhe da distribuição espacial das medianas das concentrações de chumbo na foz do rio Doce nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017.

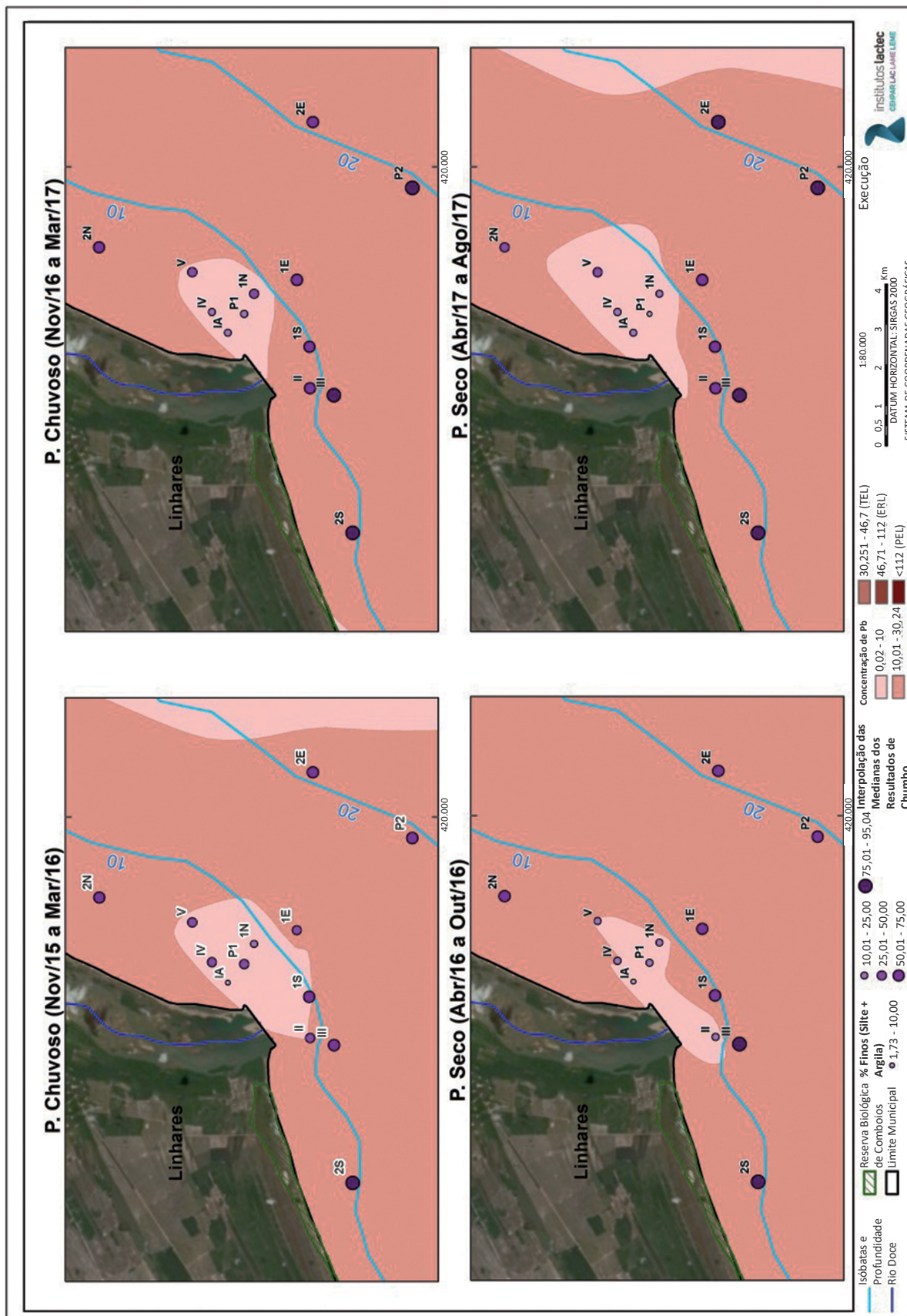
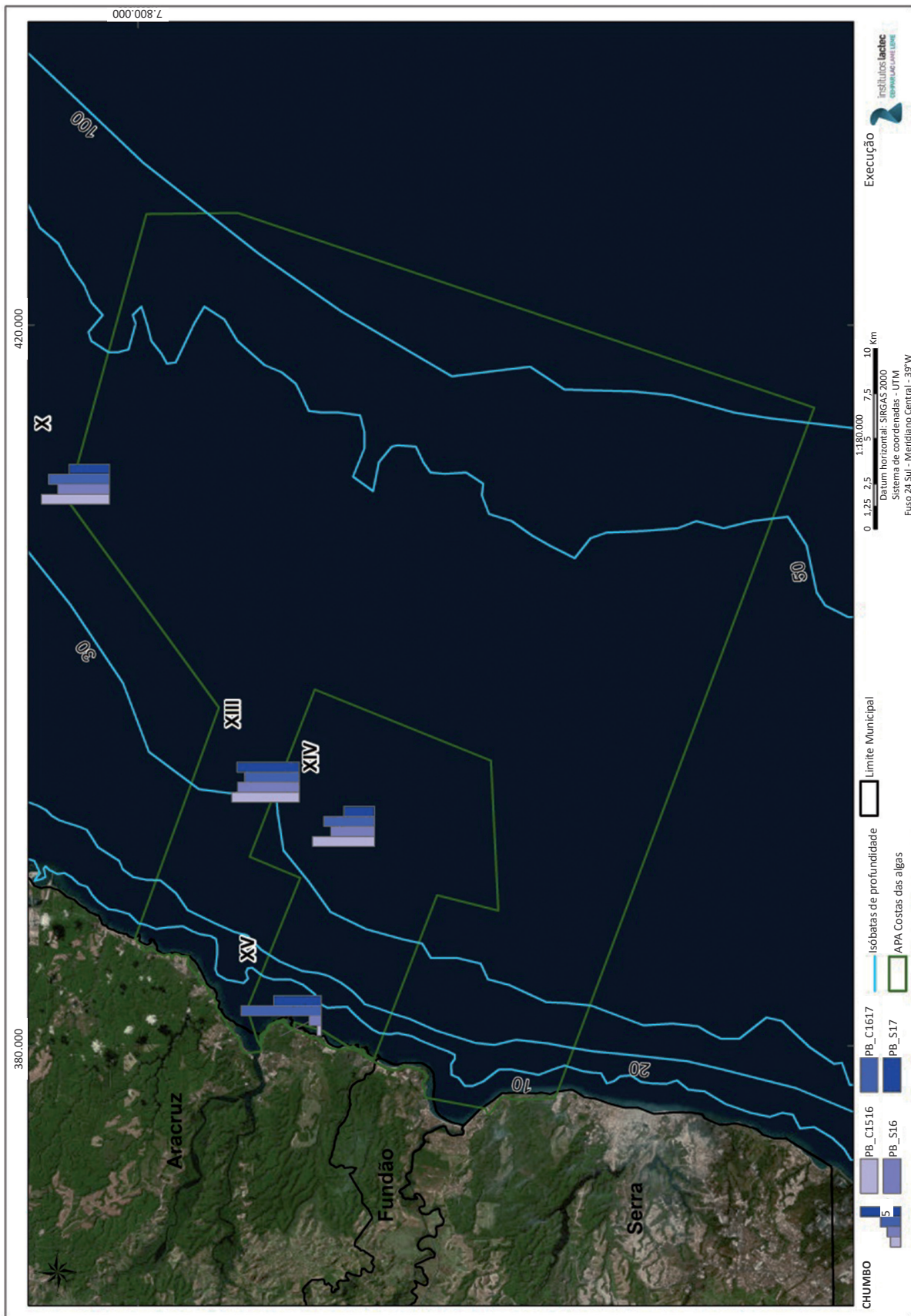


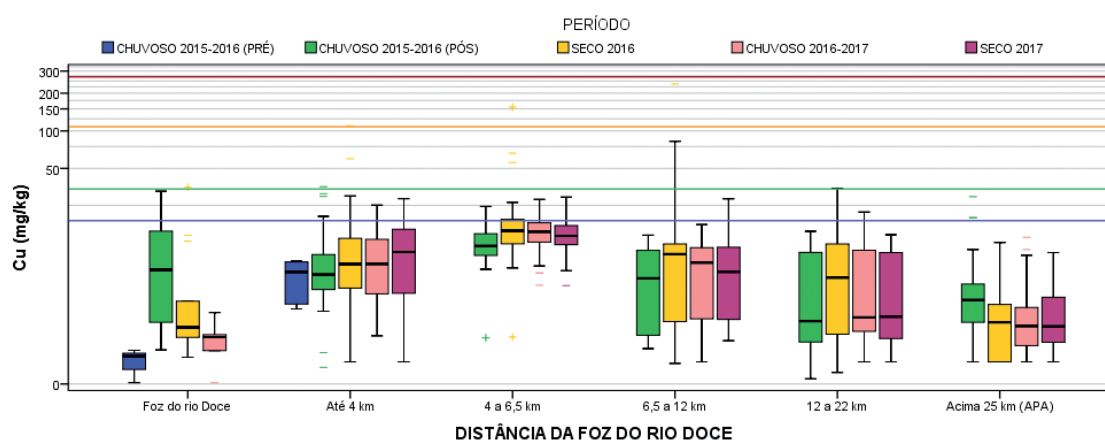
Figura 160 – Representação espacial das medianas das concentrações de chumbo nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017 na região da Costa das Algas.



5.2.2.1.11 Cobre (Cu)

As concentrações de Cu apresentaram comportamento similar aos metais anteriormente citados, com maiores valores observados nos pontos distantes entre 4 e 6,5 km da foz do rio Doce, e menores valores no período pré-rejeitos e chuvoso de 2016-2017 dos pontos localizados na foz do rio Doce (Figura 165, Figura 166 e Figura 167). Todas as medianas apresentaram valores inferiores ao TEL, indicando níveis de Cu com baixo potencial de impactar o ecossistema da região (Figura 161).

Figura 161 – Diagrama de caixa das concentrações de cobre nos conjuntos de pontos amostrados a diferentes distâncias da foz do rio Doce. Linha azul = nível de efeitos limiares (TEL); linha verde = nível de efeitos baixos (ERL); linha laranja = nível de efeitos prováveis (PEL); linha vermelha = nível de efeitos médios.



Concentrações de cobre em sedimentos marinhos e estuarinos não contaminados geralmente estão na faixa de 10 a 50 mg/kg. O cobre pode atingir concentrações muito altas (até 7.500 mg/kg) em sedimentos de estuários altamente contaminados. Grande parte do cobre no fundo do mar e sedimentos costeiros contendo baixas concentrações de matéria orgânica, está na fração residual associada à rede de silicatos de argilas e vazas siliciosas, de forma que geralmente há uma boa correlação em sedimentos não contaminados entre as concentrações de alumínio (indicativo de minerais de argila) e cobre (NEFF, 2002).

As concentrações de Cu verificadas em amostras de MPS (Figura 162) obtidas antes da chegada da pluma de rejeitos ao ambiente estuarino por UFES (2017), indicam que a chegada da pluma não aumentou substancialmente as concentrações deste metal em suspensão, o mesmo sendo verificado nos sedimentos superficiais por ROMERO et al. (2017) (Figura 164). GOLDER (2016) obteve concentrações de Cu em sedimentos oceânicos em níveis similares aos observados nos outros dois estudos (Figura 163). Os resultados obtidos por estudos anteriores na região próxima da foz do rio Doce (AGUIAR et al., 2014) e na APA Costa das Algas (CTA, 2009) apresentaram concentrações de Cu de até 20 mg/kg, nível similar ao verificado nos estudos realizados após o desastre e nos resultados do monitoramento ambiental.

Figura 162 – Concentrações de cobre no material particulado em suspensão do ambiente estuarino em momento anterior e posterior à chegada da pluma de rejeitos (UFES, 2017).

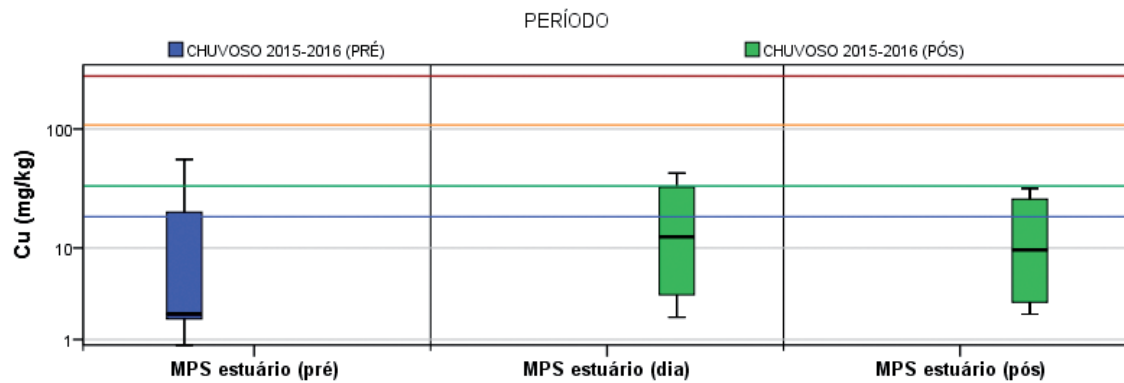


Figura 163 – Concentrações de cobre no ambiente estuarino, praia e oceano após a incidência da pluma de rejeitos na região (GOLDER, 2016).

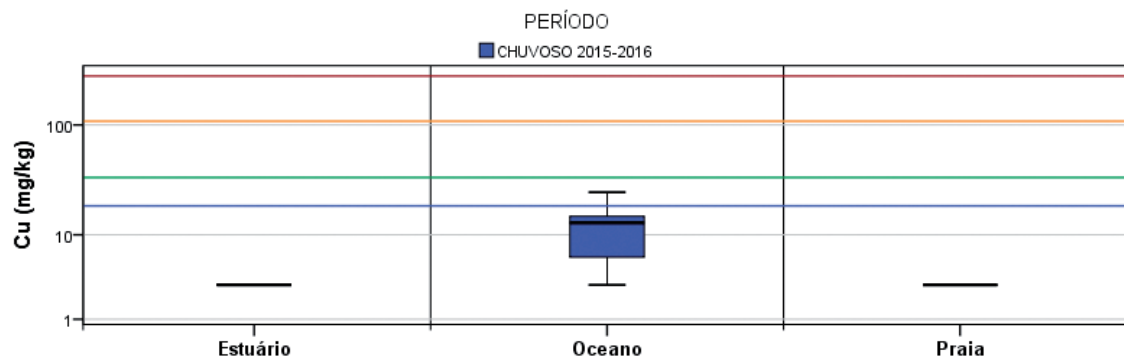


Figura 164 – Concentrações de cobre em secções de diferentes profundidades dos sedimentos do estuário e na lama de rejeitos (ROMERO, 2017).

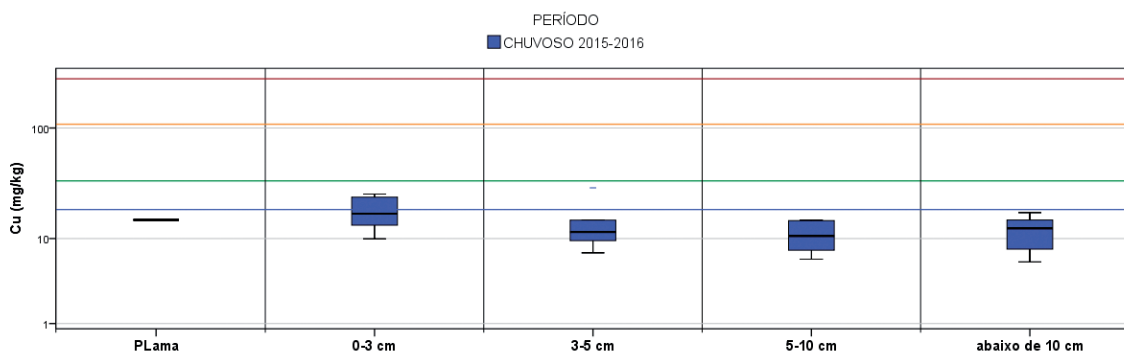


Figura 165 – Distribuição espacial das medianas das concentrações de cobre nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017.

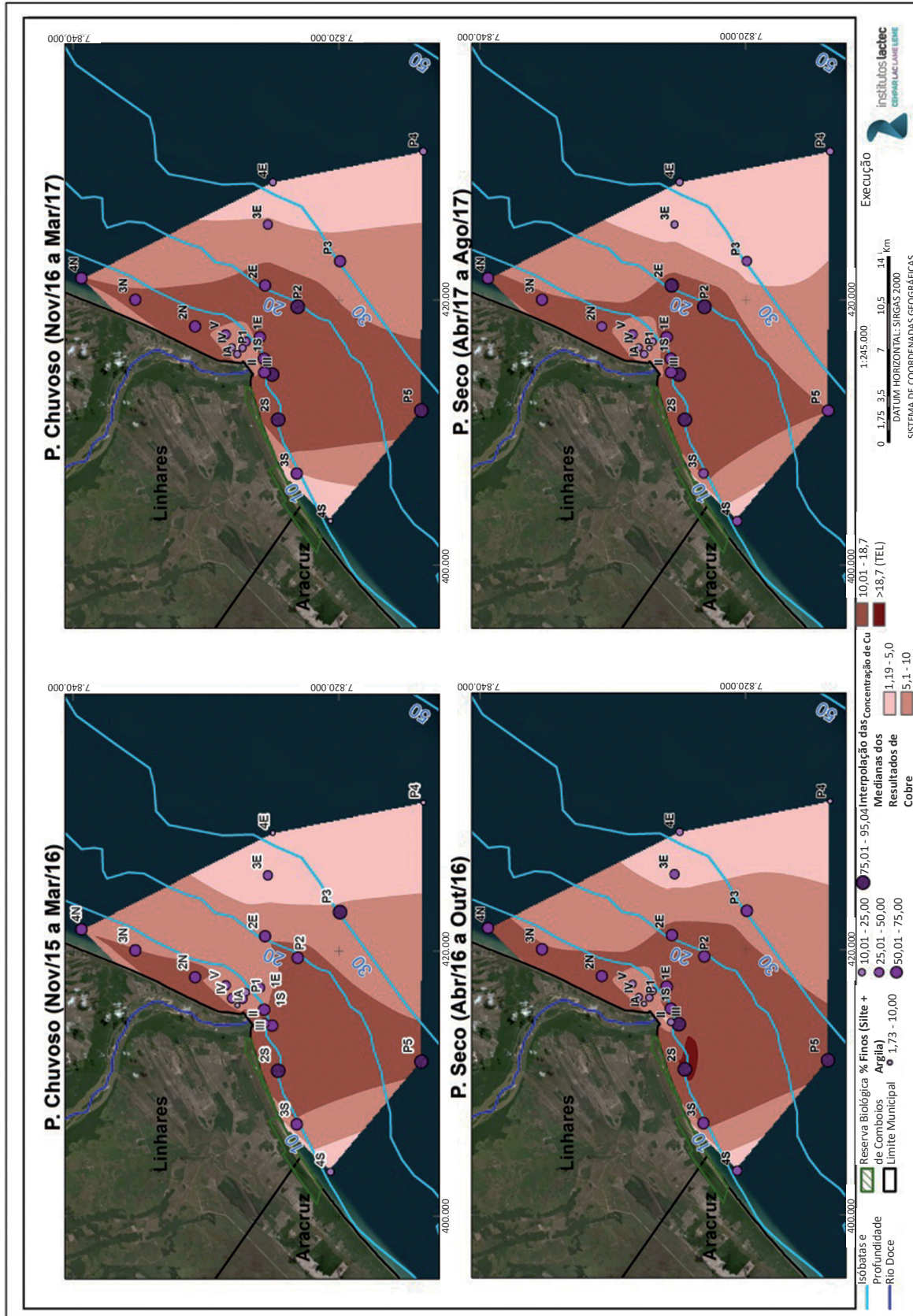


Figura 166 – Detalhe da distribuição espacial das medianas das concentrações de cobre na foz do rio Doce nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017.

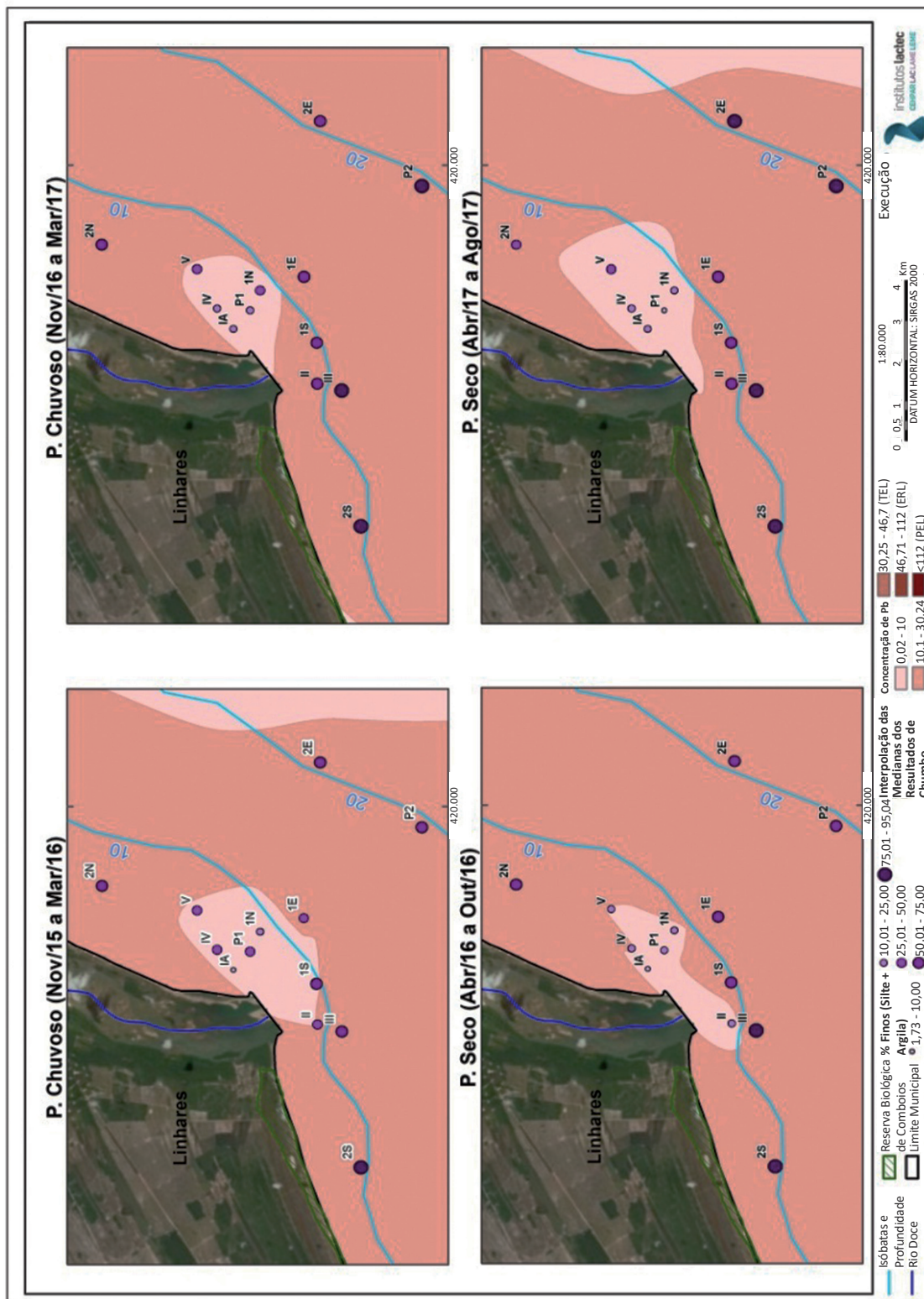
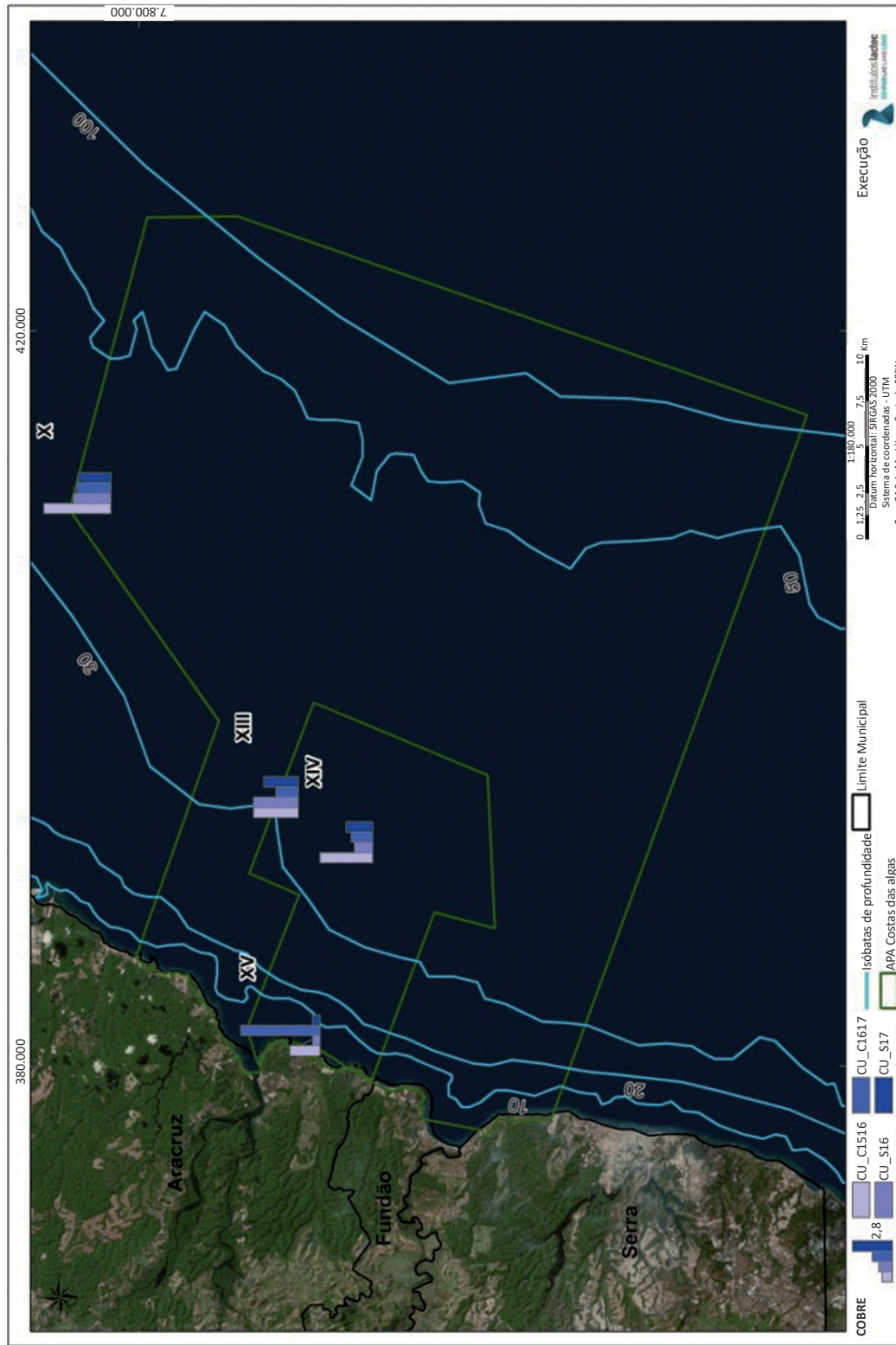


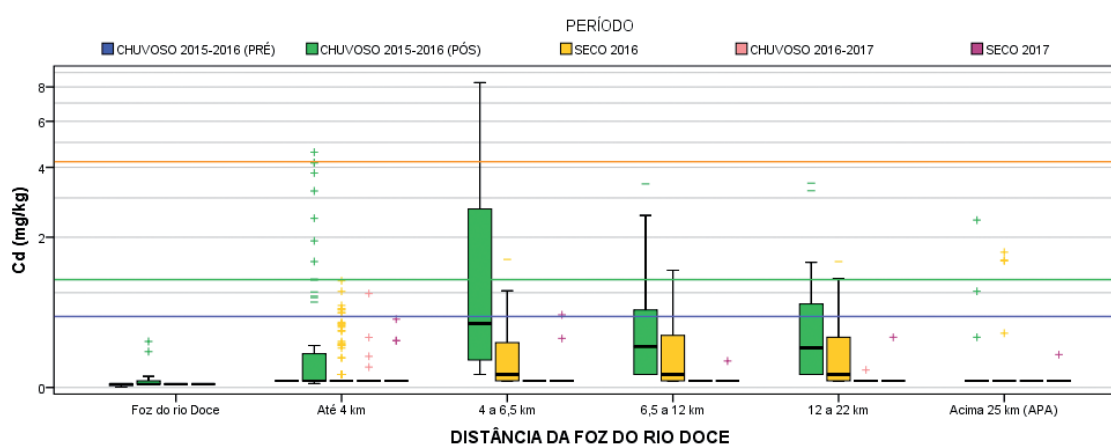
Figura 167 – Representação espacial das medianas das concentrações de cobre nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017 na região da Costa das Algas.



5.2.2.1.12 Cádmió (Cd)

As concentrações de Cd apresentaram importante aumento em amostras do período chuvoso de 2015-2016, após a chegada da pluma de rejeitos ao ambiente marinho, principalmente em amostras localizadas entre 4 e 6,5 km da foz do rio Doce, onde concentrações alcançaram níveis superiores ao PEL (Figura 171, Figura 172 e Figura 173). Os resultados do período seco de 2016 apresentaram valores que ultrapassaram TEL em distâncias de 4 a 22 km da foz, sendo que nos demais períodos monitorados as concentrações de Cd mantiveram-se abaixo de TEL (Figura 168).

Figura 168 – Diagrama de caixa das concentrações de cádmio nos conjuntos de pontos amostrados a diferentes distâncias da foz do rio Doce. Linha azul = nível de efeitos limiáres (TEL); linha verde = nível de efeitos baixos (ERL); linha laranja = nível de efeitos prováveis (PEL).



As concentrações de cádmio em sedimentos marinhos não contaminados geralmente estão na faixa de 0,1 a 0,6 mg/kg. Contribuições naturais de cádmio estão associadas a minerais pesados em argilas naturais da região. A concentração média de cádmio nos sedimentos da Baía de Terra Nova, na Antártida, é de 0,26 mg/kg, com concentrações mais elevadas associadas à fração de sedimentos de grão fino (NEFF, 2002).

As concentrações de Cd verificadas em amostras de MPS (UFES, 2017) mantiveram-se sempre inferiores a TEL, verificando-se um leve aumento nas concentrações de Cd nos dias após a chegada da pluma de rejeitos em comparação ao período anterior (Figura 169). Este resultado indica que o material particulado transportado pela pluma de rejeitos não apresenta potencial para elevar as concentrações de Cd no ambiente para níveis potencialmente tóxicos aos organismos da região. Com relação ao estudo realizado por GOLDER (2016) em sedimentos estuarinos, de praia e oceânicos, as concentrações observadas mantiveram-se em 1 mg/kg, valor superior ao TEL mas inferior a ERL, não indicando impactos significativos ao meio ambiente (Figura 170). Estudos anteriores realizados por PORTOCEL (2010 e 2008) na região da Costa das Algas apresentou concentrações de Cd entre 0,3 e 0,5 mg/kg, não sendo encontrados estudos anteriores com concentrações de Cd para a região da foz do rio Doce.

Figura 169 – Concentrações de cádmio no material particulado em suspensão do ambiente estuarino em momento anterior e posterior à chegada da pluma de rejeitos (UFES, 2017).

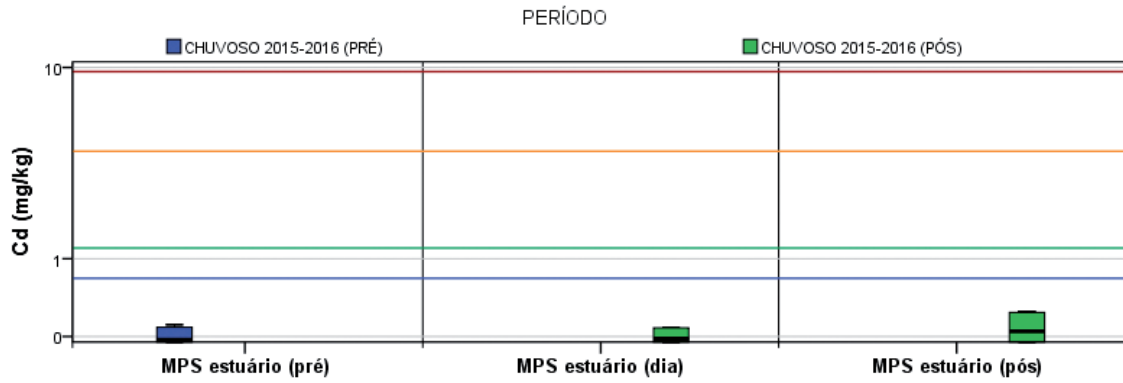


Figura 170 – Concentrações de cádmio no ambiente estuarino, praia e oceano após a incidência da pluma de rejeitos na região (GOLDER, 2016).

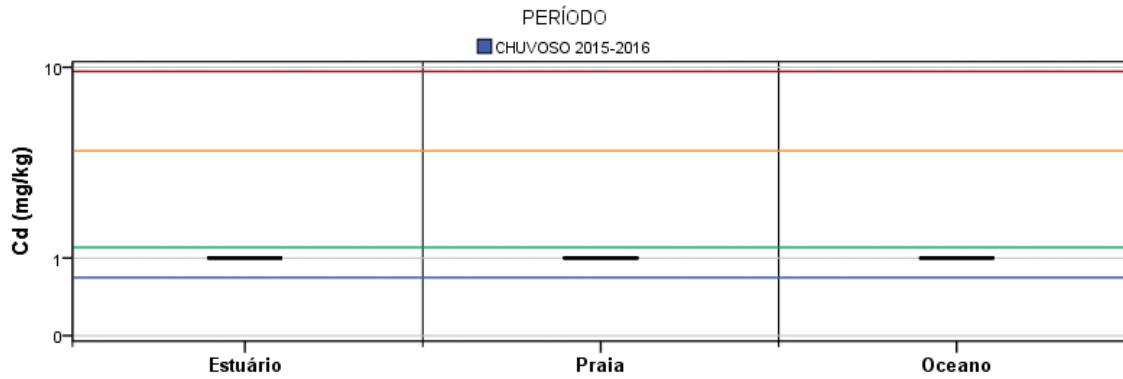


Figura 171 – Distribuição espacial das medianas das concentrações de cádmio nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017.

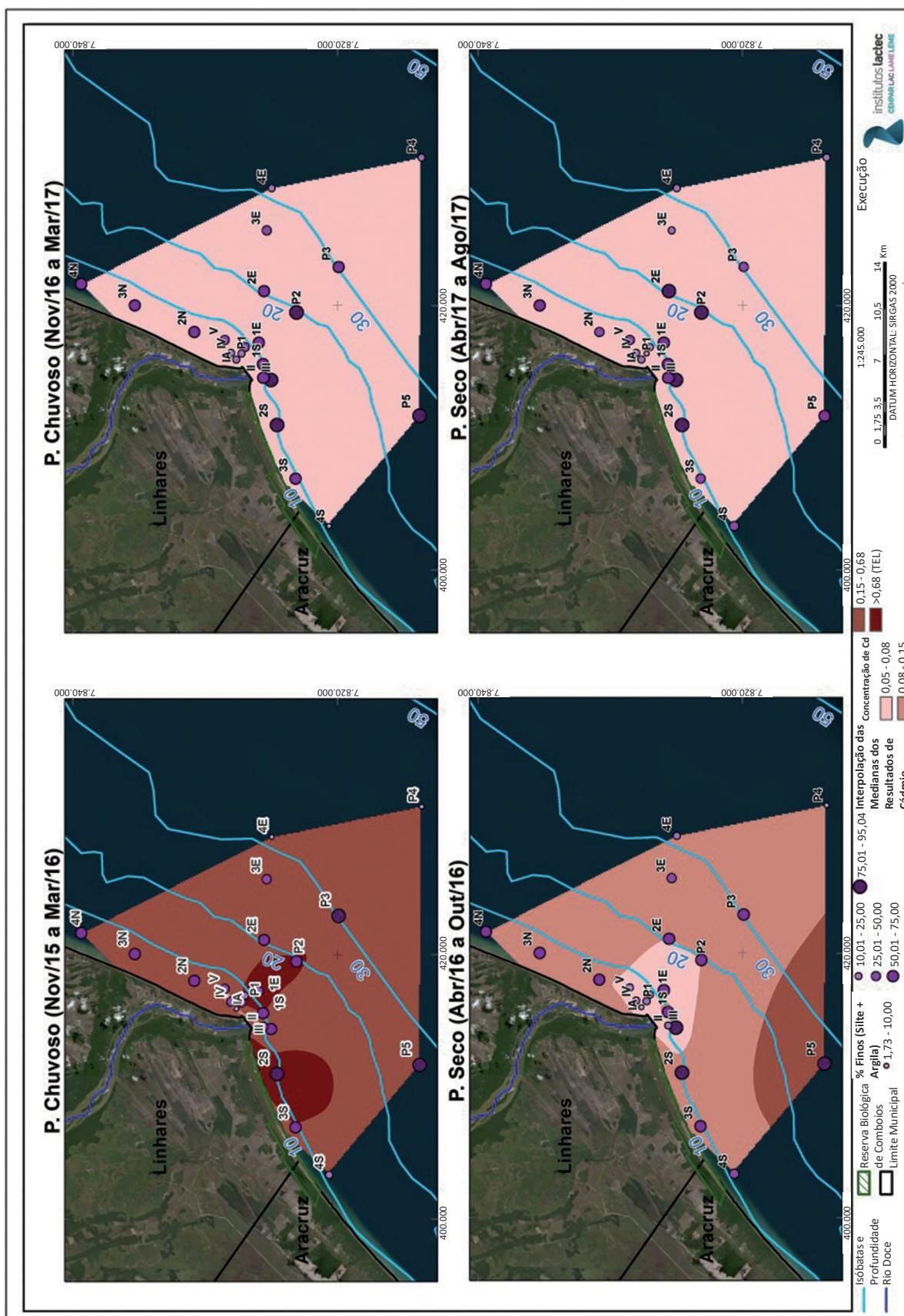
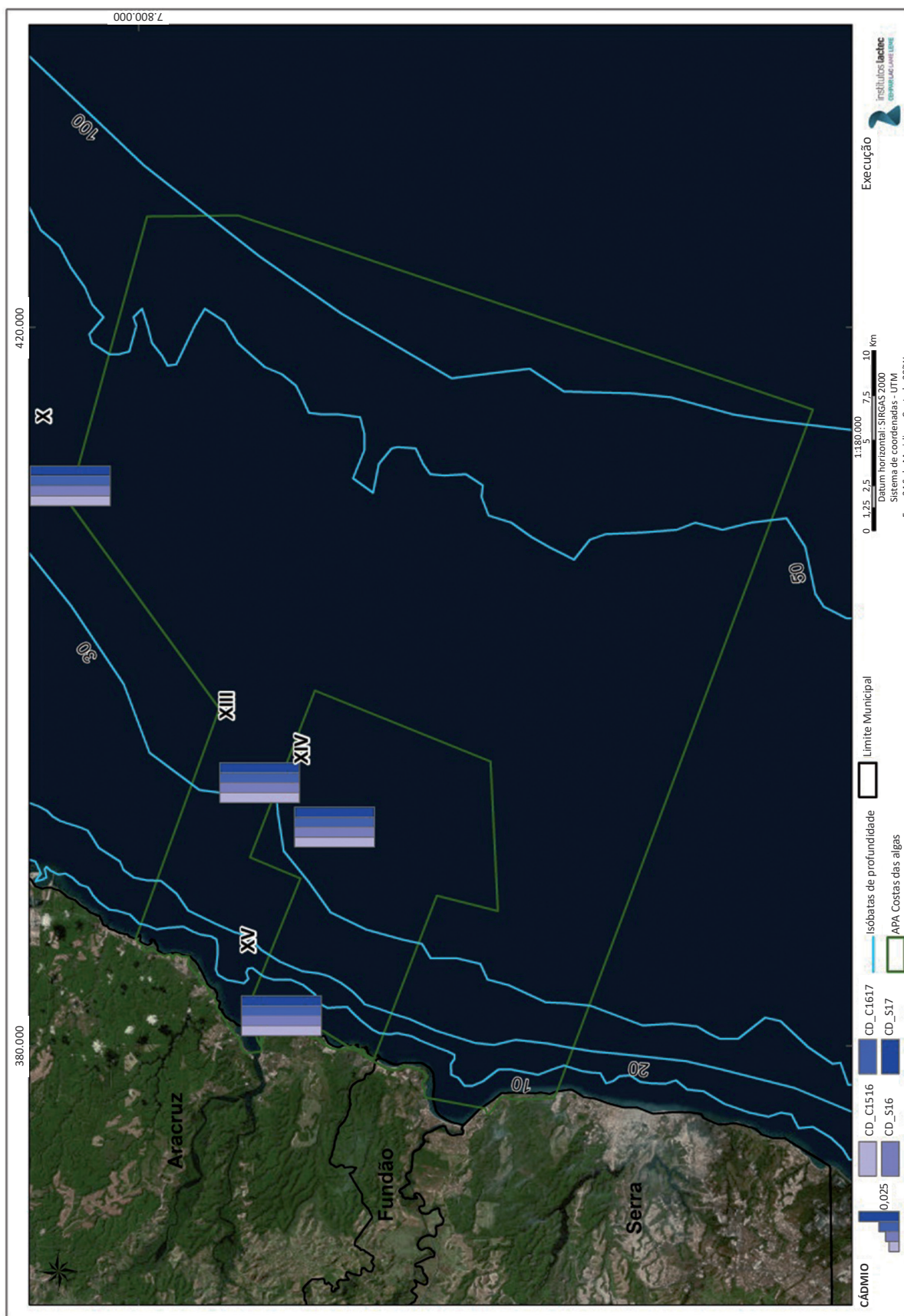


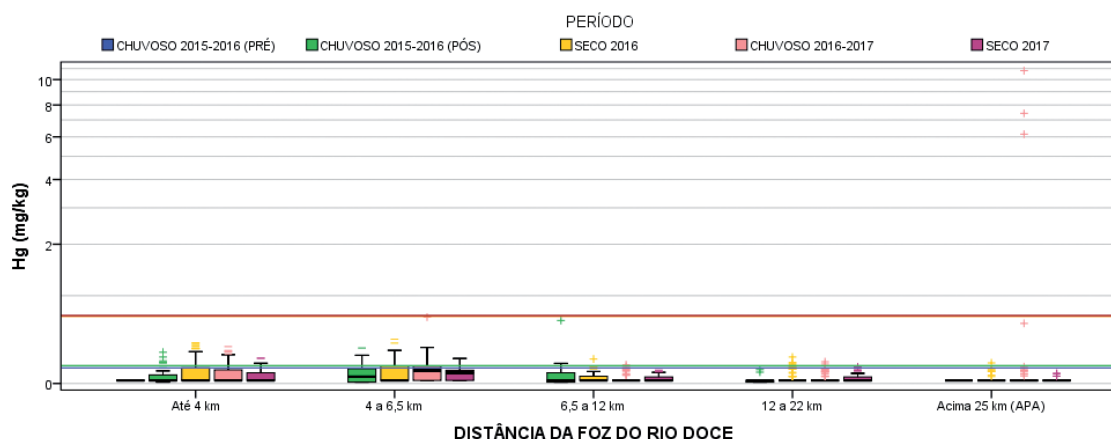
Figura 173 – Representação espacial das medianas das concentrações de cádmio nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017 na região da Costa das Algas.



5.2.2.1.13 Mercúrio (Hg)

As maiores concentrações de Hg foram verificadas principalmente em pontos distantes de 4 a 6,5 km da foz do rio Doce (Figura 175, Figura 176 e Figura 177). No entanto, todas as medianas se mantiveram inferiores ao valor de TEL, indicando uma baixa influência deste elemento sobre a qualidade ambiental da região (Figura 174).

Figura 174 – Diagrama de caixa das concentrações de mercúrio nos conjuntos de pontos amostrados a diferentes distâncias da foz do rio Doce. Linha azul = nível de efeitos limiares (TEL); linha verde = nível de efeitos baixos (ERL); linha laranja = nível de efeitos prováveis (PEL); linha vermelha = nível de efeitos médios.



Concentrações de mercúrio total em sedimentos estuarinos e marinhos não contaminados são geralmente iguais ou inferiores a 0,2 mg/kg, exceto em áreas de depósitos naturais contendo mercúrio. A concentração de mercúrio na superfície dos sedimentos da bacia do Oceano Ártico varia de 0,034 a 0,116 mg/kg, com a concentração diminuindo para 0,01 a 0,065 mg/kg no estrato de 5 cm. Não há correlação entre as concentrações de mercúrio e alumínio (um indicador dos minerais argilosos) nos sedimentos marinhos, pois a maior parte do mercúrio lábil nos sedimentos é complexada com matéria orgânica particulada e dissolvida nos sedimentos, e não com partículas de argila ou revestimentos de óxido de ferro nas partículas de argila.

O elemento Hg não foi analisado por UFES (2017), ROMERO (2017) ou GOLDER (2016). O estudo realizado por CTA (2009) verificou a ocorrência de concentração de Hg de até 0,62 mg/kg em amostra obtida na região da Costa das Algas, enquanto que ECOLOGY (2013) verificou a ocorrência de concentrações de Hg inferiores ao limite de quantificação de 0,05 mg/kg em todas as amostras da região da foz do rio Doce analisadas.

Figura 175 – Distribuição espacial das medianas das concentrações de mercúrio nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017.

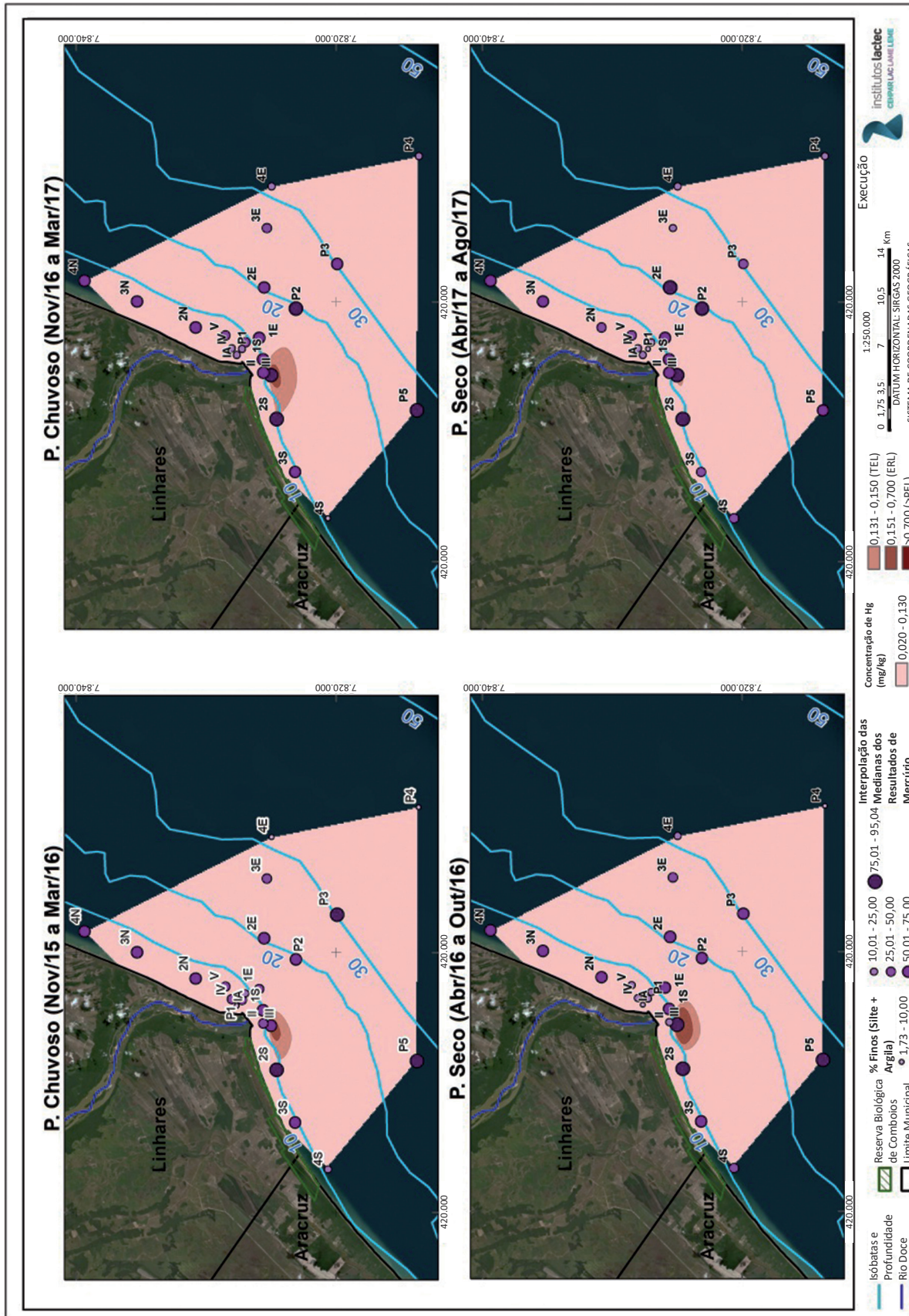


Figura 176 – Detalhe da distribuição espacial das medianas das concentrações de mercúrio na foz do rio Doce nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017.

