



DOC. N.º 05

RELATÓRIO TÉCNICO

Avaliação Hidrológico-Hidrodinâmica dos Rios Iguaçu e Sarapuí nas proximidades do Campo do Bomba, Duque de Caxias- RJ

AQF2021003 – META 2

Executora



Contratante

CEARJ DUQUE DE CAXIAS S.A.

Rio de Janeiro, setembro de 2021

 aquaflexus Consultoria Ambiental em Recursos Hídricos	Nº DO CONTRATO		Nº DO DOCUMENTO	
	AQF2021003		R2 – META 2	
Serviços Técnicos Especializados em Recursos Hídricos				
AVALIAÇÃO HIDROLÓGICO-HIDRODINÂMICO DOS RIOS IGUAÇU E SARAPUÍ NAS PROXIMIDADES DO CAMPO DO BOMBA, DUQUE DE CAXIAS- RJ				
Revisão	Data	Resp.	Verif.	Descrição
00	10/09/2021	MMS	AKBO	Emissão inicial para a contratante
Elaborado por		Coordenador		Responsável Técnico
Antonio Krishnamurti Beleño de Oliveira		Matheus Martins de Sousa		Matheus Martins de Sousa CREA 2008104364

Apresentação

O presente relatório, nomeado *Avaliação Hidrológico-Hidrodinâmica dos Rios Iguaçu e Sarapuí, nas proximidades do Campo do Bomba, Duque de Caxias- RJ*, vem cumprir objeto de contrato para estudo de consultoria técnica especializada, firmada com a empresa CEARJ DUQUE DE CAXIAS S.A.

Este documento apresenta os resultados da Meta 2, referente ao desenvolvimento de um projeto hidráulico, a nível de concepção, que seguindo as diretrizes de desenvolvimento da RMRJ, possibilite a utilização do terreno do Campo do Bomba I para fins comerciais e industriais e, concomitantemente, indique as devidas melhorias na macrodrenagem dos rios Sarapuí e Iguaçu, considerando, ainda, o impacto nos imóveis e comunidades do entorno.

Índice

Apresentação.....	2
1. Introdução.....	4
1. Perguntas e Respostas sobre o Campo do Bomba	7
1.1 Influência do Campo do Bomba: Principais Perguntas.....	7
2. Estudos Quantitativos de Chuva, Vazão e Níveis D'água	15
2.1. Estudos Hidrológicos	16
2.2. Estudos Hidrodinâmicos	21
3. Considerações Finais	75
4. Referências Bibliográficas	77
ANEXO 1 – SISTEMA DE MODELAGEM.....	78

1. Introdução

O terreno denominado Campo do Bomba está situado no trecho final de uma região frágil, sob o ponto de vista de macrodrenagem. As águas do rio Capivari se unem às já volumosas águas dos rios Botas-Iguaçu em uma região repleta de baixios, onde hoje estão instalados alguns polders habitados. Antes do deságue dessas águas na Baía de Guanabara, o rio Iguaçu recebe a contribuição do também caudaloso rio Sarapuí, que desce entre baixios, onde existem outros tantos polders habitados. Originalmente com foz própria na Baía de Guanabara, hoje o Rio Sarapuí divide a foz com o Rio Iguaçu, tendo sido canalizado para afluir a este, em seu trecho final.

São essas características, de terrenos planos com diques limitando a planície de inundação natural desses rios, que fazem da região logo a montante da confluência dos rios Iguaçu e Sarapuí, uma região com fragilidades às enchentes fluviais. Vale destacar que, mesmo com os polders, as regiões internas destas áreas não são completamente protegidas contra inundações, uma vez que o crescimento da urbanização, a desconfiguração de alguns diques (por retirada de material e falta de manutenção) e a própria possibilidade de mudanças climáticas podem introduzir elementos de risco residual, que, se materializado, podem trazer consequências dramáticas para a região.

Assim, pode-se dizer que esta é uma região com fragilidades físicas, naturais e urbanas, que levam a uma susceptibilidade a inundações, com materialização de danos importantes, e, portanto, são muito importantes ações de aumento de sua resiliência, para melhor conviver com os desafios impostos ao desenvolvimento local.

Diante disso, o vasto terreno de 5 km² do Campo do Bomba (em amarelo na Figura 1.1) foi transformado em uma Área de Proteção Ambiental - APA para ter o uso de seu solo regulado, de modo a proteger essa frágil região, bem como as regiões próximas a montante, das cheias naturais dos rios. Particularmente, para exercer proteção para a região do rio Iguaçu marcada em vermelho na Figura 1.1 e, em especial, para o bairro São Bento, em Duque de Caxias.



Figura 1.1 - Parte densamente habitada das bacias hidrográficas dos rios Sarapuí e Iguaçu, com destaque para as áreas protegidas pelo Canal do Campo-do-Bomba, incluindo o bairro São Bento.

Para analisar o comportamento hidrodinâmico das águas dos rios Iguaçu e Sarapuí e estudar a influência e possíveis usos deste terreno de 5 km², situado entre os trechos finais dos dois rios, no controle das cheias das duas bacias, foi construído um modelo matemático hidrodinâmico, com capacidade de reproduzir os eventos naturais de inundação e sua relação com o ambiente construído, e foram feitas simulações dessas bacias hidrográficas sob três clássicas situações de chuvas, a saber: (1) Chuva de tempo de recorrência (TR) de 10 anos para análise dos possíveis alagamentos dos pisos das ruas, considerando que o TR de 10 anos é a referência superior para o projeto de microdrenagem; (2) Chuva de TR de 25 anos para análise de possíveis alagamentos de casas e quarteirões da zona urbana, lembrando que este TR é usualmente definido como referência para o projeto da macrodrenagem; e (3) Chuva de TR de 50 anos para análise das graves consequências dessas tempestades, cuja intensidade é superior àquela usualmente recomendada para projetos de macrodrenagem e implica em provável falha do sistema, que tem, portanto, proteção inferior a este limiar.

Destaca-se, em resumo e sob o ponto de vista das recomendações técnicas vigentes, que o TR de 10 anos se refere aos projetos de microdrenagem; o TR de 25 anos se refere aos projetos de macrodrenagem; e o TR de 50 anos é usualmente utilizado como

referência de verificação de funcionamento do sistema para uma chuva maior do que as referências de projeto.

O grande conjunto de resultados foi ordenado para poder melhor explicar a influência do Campo do Bomba no controle de cheias dessa região da Baixada densamente habitada. Essa influência será discutida nesse relatório, organizado em duas partes.

No primeiro capítulo são apresentadas algumas das principais perguntas que costumam balizar as discussões sobre a influência do Campo do Bomba nas cheias da Baixada. Nessa discussão inicial, será apresentado um texto mais conceitual, resultado de uma análise qualitativa (sempre respaldada pelos resultados da modelagem matemática), em uma discussão mais fluida, que funciona como quadro geral sintético, orientado para uma compreensão mais rápida do leitor.

No segundo capítulo são apresentados os Estudos Hidrológicos e todos os Estudos Hidrodinâmicos efetuados, de uma forma técnica mais usual, tendo como base os cenários de simulação estabelecidos, para uma análise formal quantitativa da influência do canal do Campo do Bomba nas cheias naturais da região. Essa análise é ilustrada com as manchas de inundação das regiões habitadas.

1. Perguntas e Respostas sobre o Campo do Bomba

Esse capítulo visa discutir a influência do Campo do Bomba na forma com que costumeiramente o assunto é abordado nas discussões com a sociedade organizada. Para tanto, selecionaram-se as perguntas mais frequentes, um total de seis, cujas respostas visam elucidar os principais pontos de interrogação sobre a influência que o Campo do Bomba exerce nessa região da Baixada Fluminense. Trata-se, pois, de um texto mais conceitual para essa questão ambiental, que procura esclarecer, de uma forma ampla, como o Campo do Bomba influencia os níveis d'água dos rios da região. Todas as respostas fornecidas para as seis perguntas são provenientes de estudos técnicos e respaldadas pelos resultados de inúmeras modelagens matemáticas. Adicionalmente, para embasar esta discussão e colocar luz aos números, o Capítulo 2, na sequência, mostra todos os resultados das modelagens matemáticas efetuadas neste contexto.

1.1 Influência do Campo do Bomba: Principais Perguntas

- a) O terreno do Campo do Bomba gera, nos dias de hoje, algum efeito mitigador de cheias na região?

Resposta: De forma geral, uma porção de território da bacia pode cumprir funções hidrológicas úteis no controle de inundações, principalmente no que se refere às funções de armazenamento e infiltração. Quando um terreno natural é impermeabilizado, como resultado frequente do processo de urbanização, são aumentados os escoamentos superficiais e os picos de cheia. Também no processo de urbanização, áreas naturais de armazenamento e retenção acabam sendo ocupadas e aplainadas, influenciando o comportamento das cheias. Porém, em áreas já muito modificadas e sujeitas a inundação, como é o caso da Baixada Fluminense, a infiltração em áreas remanescentes não consegue cumprir um papel relevante para evitar inundações, pois a escala de tempo em que ocorre a infiltração é bastante maior que aquela dos processos superficiais de alagamento e inundação. É claro que aumentar a impermeabilização ainda mais pode agravar a geração de escoamentos, mas quando as inundações já são uma realidade no meio urbano, a sua reversão precisa passar pela reorganização dos escoamentos, quando, então, o armazenamento temporário de cheias pode desempenhar um relevante papel na minimização das inundações.

O terreno do Campo do Bomba, como hoje se encontra, pouco (ou nada) está mitigando as cheias da região, pois ele tende a estar frequentemente úmido, com pouca

capacidade de infiltração, e não reserva tanta água em sua enorme área superficial, que, já na parte final da bacia, recebe lâminas de alagamento mais modestas. No entanto, com algumas obras hidráulicas específicas, no interior desse vasto terreno, pode ser construído um sistema de apoio para atuar de forma eficaz como mitigador de cheias, particularmente para a área mais fragilizada do rio Iguaçu.

Essa foi a única razão de o terreno ser preservado como uma APA, que possa permitir, futuramente, a construção de obras específicas de mitigação de cheias, com alcance de proteção para uma importante região da Baixada. Essa região é densamente habitada, apresenta inúmeras áreas de baixios e se encontra com uma fragilidade acentuada para enfrentar as enchentes, principalmente a jusante do rio Capivari, área destacada em vermelho na Figura 1.1.

b) Se o terreno do Campo do Bomba não gera efeito mitigador de cheias relevante na região, por que o terreno não pode ser ocupado?

Resposta: O solo desse terreno é, em boa parte, semi-encharcado e constituído por profundas camadas de argila-mole, de baixíssima resistência, o que dificulta a construção de edificações e infraestrutura de microdrenagem. Uma eventual ocupação do terreno do Campo do Bomba, sem o devido cuidado técnico, poderá criar enormes e irreversíveis problemas locais, com possibilidade de prejuízos frequentes e altos custos de manutenção. Esses problemas, provavelmente, não se refletiriam na macrodrenagem regional, mas seriam um transtorno relevante na microdrenagem local. Além disso, o uso não planejado desse terreno poderia impedir, DEFINITIVAMENTE, a possibilidade de implantar obras de mitigação (ainda que parcial) de cheias para uma importante área da Baixada, a montante, onde milhares de famílias estão vivendo com riscos maiores do que o desejado. Portanto, essa “reserva” de área é fundamental para uma ação de mitigação que tenha um cunho sistêmico, e precisa ser planejada para evitar, também, futuros problemas locais. Não é possível imaginar soluções fragmentadas para essa região, sem aumentar o risco de forma geral.

Em outras palavras, o referido terreno foi protegido pela criação de uma APA para que pudessem ser requeridos os especiais cuidados que sua eventual ocupação pudesse ensejar. Toda e qualquer ocupação, parcial ou total, do terreno desta APA deve ser precedido de estudos que garantam: (1) a construção de uma obra de mitigação das cheias da macrorregião circunvizinha; e (2) o preparo do terreno para implantação de um especial sistema de microdrenagem local, compatível com as características hidráulicas deste local entre rios.

c) O que exatamente deve ser feito no Campo do Bomba para que sejam cumpridos os objetivos da mencionada APA?

Resposta: O efeito mitigador de cheias da macrorregião pode ser alcançado com a construção de um largo canal que interligue os dois rios, Iguaçu e Sarapuí, logo a jusante da Estrada de Ferro que corta o terreno. Embora seja onerosa, a construção desse canal conduziria parte das cheias do rio Sarapuí para o rio Iguaçu e vice-versa, utilizando, ao máximo, a capacidade desses dois trechos de rios em conduzir as cheias para a Baía de Guanabara. Deve-se destacar que as bacias hidrográficas dos rios Iguaçu e Sarapuí têm, cada uma, tempos de concentração distintos, ou seja, o tempo que leva para a chuva que cai em cada uma das bacias se transformar em vazão e percorrer o caminho até a foz é diferente. Assim sendo, a união dos dois rios pelo canal de interligação proposto faria aumentar a capacidade de calha, pelo compartilhamento de ambos os leitos para a passagem das vazões de cheia de cada bacia, em momentos distintos e sucessivos. Isso é particularmente importante para o rio Iguaçu, que tem áreas mais frágeis a montante da região do Campo do Bomba.

O pleno uso (em conjunto) dos dois trechos finais desses dois rios desafogam bastante o fluxo das cheias de cada bacia e garante um efeito de proteção para a área urbana destacada em branco na Figura 1.1, seja nas cotas das manchas das inundações, seja no tempo de permanência dessas inundações.

Implantado o canal de interligação dos rios Sarapuí-Iguaçu, o restante do terreno do Campo do Bomba terá as mesmas funções discutidas na Pergunta 1. Isto é, essa parcela do terreno pouco mitigará as cheias da região, pois este não reserva muita água em sua área superficial e tem capacidade de infiltração muito limitada pela característica de terreno encharcado. No entanto, no caso de haver uma ocupação racional desse restante do Campo do Bomba, há que se ter em mente que a microdrenagem dessa parcela precisa destinar as águas pluviais para o referido canal de interligação e deve cuidar para que não haja afogamentos importantes desta rede, com possibilidade de remanso e alagamento a montante desta, no terreno remanescente aproveitável.

O referido canal de interligação irá garantir maiores declividades hidráulicas dos diversos trechos das linhas de microdrenagem e, portanto, maiores fluxos drenantes.

No caso de haver necessidade de instalação de comportas tipo *flap* (fluxo em sentido único) no sistema de microdrenagem local, a montante, tais comportas deverão ter tempo de abertura maior (por sofrerem menores represamentos, com os níveis agora mais baixos e tempos menores de retenção), o que implica em esvaziamento mais

rápido das águas de chuva acumuladas superficialmente. Finalmente, no caso de o sistema de microdrenagem local demandar bombeamento elétrico das águas pluviais, os conjuntos motor-bomba serão menores e o consumo de energia será consideravelmente menor, o que implica também em drenagem mais segura e eficaz.

Além das vantagens mencionadas acima, o canal implantado poderá auxiliar o funcionamento do Pôlder São Bento, ainda não executado. A região desse pôlder apresenta alta fragilidade a inundações, com habitações sendo frequentemente alagadas. O canal poderá ser futuramente incorporado ao funcionamento do pôlder, recebendo as águas drenadas pela área ocupada.

d) De que maneira a obra hidráulica construída dentro do terreno do Campo do Bomba pode afetar a mitigação das cheias sobre a enorme área urbana destacada em branco na Figura 1.1 ?

Resposta: A obra do canal de interligação, embora inteiramente construída no terreno do Campo do Bomba, consegue promover efeito mitigador de cheias em uma considerável área urbana a montante do terreno, em particular para a área junto ao rio Iguaçu destacada em vermelho na Figura 1.1, que é a parcela mais frágil das áreas de montante. Essa mitigação de cheias se deve ao fato de esta obra conseguir abaixar o NA máximo das cheias nas proximidades do terreno e isso faz com que áreas urbanas situadas a montante fiquem mais protegidas em dias de temporais, pela possibilidade de escoar mais eficientemente as águas neste trecho final da bacia.

As cheias do rio Sarapuí se caracterizam por ocorrerem em tempos mais curtos do que as do rio Iguaçu, muito embora as cheias do rio Iguaçu sejam costumeiramente mais volumosas do que as do Sarapuí. Assim, a junção desses dois rios pelo referido canal de interligação faz com que a primeira cheia a chegar junto ao Campo do Bomba (cheia do rio Sarapuí) possa desaguar na Baía de Guanabara por dois caminhos: (a) pelo próprio leito do rio Sarapuí; e (b) pelo leito do rio Iguaçu, através do canal de interligação. Esse “duplo desague” na Baía faz com que a cheia escoe mais rapidamente e com níveis d’água mais baixos, abrindo também mais espaço para a cheia do Iguaçu, cujo pico chegará depois.

Dessa forma, quando a segunda cheia, mais lenta, vinda do rio Iguaçu, chegar junto ao Campo do Bomba, suas águas poderão também desaguar na Baía de Guanabara pelos dois caminhos; seja pelo próprio leito do rio Iguaçu, seja pelo leito do rio Sarapuí, através do canal de interligação, quando ambos se encontrarão mais esvaziados. Novamente,

o efeito do “duplo desagüe” na Baía fará com que a cheia flua mais rapidamente e com níveis d’água mais baixos.

Vale destacar o importante efeito desse canal de interligação na mitigação das cheias do *Pôlder* São Bento. A população do bairro São Bento será indubitavelmente a população mais beneficiada com a referida obra de interligação. As obras pretendidas para o bairro vêm sendo continuamente postergadas pelas dificuldades de sua execução e pelos vultosos custos envolvidos.

e) Por que esse Canal ainda não teve sua construção aquinhoadada pelas verbas destinadas à implantação de infraestrutura pública?

Resposta: A obra, embora importante, tem sua implantação dificultada pela imperativa obrigação de que as obras do canal de interligação (referente à macrodrenagem regional) sejam planejadas, conjuntamente, com as obras de ocupação urbana e implantação das obras de microdrenagem. Isso é, há que se ter um planejamento global do Campo do Bomba, seja por razões de macrodrenagem regional, seja por razões de microdrenagem local, conforme descrito a seguir:

(1) *Razão de Macrodrenagem:* A construção independente de um canal de interligação pode até atingir, no curto prazo, boa parte de seus objetivos de contribuir para mitigar cheias no sistema de macrodrenagem regional da Baixada, mas uma eventual falha geotécnica ao longo dos anos, em terreno sobre argila mole, pode pôr em risco a integridade do terreno do Campo do Bomba e afetar o efeito mitigador do canal. Além disso, uma eventual má ocupação do terreno poderá dificultar os serviços de manutenção do canal e a sua função mitigadora de cheias se perderá. Mais ainda, se a obra for realizada isoladamente, pode levar a uma impressão de “proteção irrestrita”, gerando uma falsa percepção do risco, e acabar virando um polo de atração para populações menos favorecidas, em uma expansão informal, que levará sofrimento para essa população, em um terreno de difícil ocupação e provimento de infraestrutura.

(2) *Razão de Microdrenagem:* Não resta dúvida de que o sistema de microdrenagem de um bairro urbanizado num terreno plano e baixo, como o Campo do Bomba, será um sistema complexo de comportas *flaps* e/ou bombeamento, cujo projeto é fortemente dependente da forma de ocupação e com rigoroso ordenamento no uso do solo. Isto é, na eventual ocorrência de uma desobediência a um prévio plano de ocupação do vasto terreno do Campo do Bomba, essa ocupação poderá se transformar em um bairro absolutamente degradado pelo mau funcionamento da microdrenagem.

Ainda que o mau funcionamento da microdrenagem recaia tão somente sobre os eventuais habitantes do bairro, a degradação do bairro acabará por implicar na perda de funcionalidade do canal mitigador de cheias. Em suma, o bairro poderá sofrer pela inoperância da microdrenagem, bem como pela proximidade do canal de interligação com uma função de macrodrenagem inoperante.

Os vários pôlderes do Iguaçu no entorno são testemunhas da necessidade de uma especial atenção para o problema da drenagem e da ocupação não planejada. O entorno do Campo do Bomba nos oferece também o exemplo mais crítico da região: O Pôlder São Bento. Esse bairro, nas margens do rio Iguaçu e colado ao Campo do Bomba, potencializa todas as dificuldades já mencionadas por estar no ponto de jusante da área de maior fragilidade para as inundações.

Essas duas razões mencionadas podem explicar as dificuldades em alocar verbas públicas para a urbanização de terrenos como o Campo do Bomba, principalmente se considerarmos que a obediência rigorosa de um plano de ocupação do solo é praticamente incompatível com o histórico de ocupação gerado no contexto da administração pública municipal na Baixada Fluminense. É de se esperar um extraordinário risco de insucesso para os ocupantes de um bairro de formato tradicional sob a administração pública municipal.

Isso pode explicar por que o Poder Público se conteve em colocar verbas públicas para transformar o Campo do Bomba em uma área de uso coletivo sob a administração pública municipal. Isso pode também explicar por que o uso do Campo do Bomba para uma ocupação empresarial privada, ainda que sob concessão, pode apresentar benefícios para:

- (a) Uma enorme área urbana, densamente habitada sob risco de inundações, a montante;
- (b) O desenvolvimento regional de vários bairros da Baixada no entorno;
- (c) A municipalidade; e
- (d) O empreendedor concessionado.

f) Muito se fala que o terreno do Campo do Bomba não deva ser impermeabilizado para facilitar a infiltração das cheias que se acumulam sobre sua superfície. Qual a importância da impermeabilização deste terreno na macrodrenagem da região circunvizinha?

Resposta: Vejamos, inicialmente, como a drenagem de uma região é costumeiramente analisada. Costuma-se analisar as cheias sob três diferentes visões, a saber: (1) Alagamentos de pistas de ruas; (2) Inundações de casas e quarteirões; e (3) Desastres mais graves. Para cada um desses três casos, as Normas da engenharia indicam que o projetista deva utilizar uma determinada “Chuva de Projeto”.

Para análise dos alagamentos de ruas, como destacado anteriormente, costuma-se utilizar uma chuva com Tempo de Recorrência de 10 anos. Para análise das inundações de casas e quarteirões recomenda-se utilizar uma chuva com Tempo de Recorrência de 25 anos, enquanto para análise dos desastres mais graves costuma-se usar uma chuva com Tempo de Recorrência de 50 (ou 100) anos. Dentro desse contexto, todas as análises aqui feitas são construídas para os 3 diferentes tempos de recorrência, escolhidos como 10, 25 e 50 anos.

Para encontrar uma resposta quantitativa para a pergunta feita acima, a fim de evitar dúvidas, são considerados os rios Iguaçu e Sarapuí com a batimetria com a qual estavam em janeiro de 2019. O terreno do Campo do Bomba é considerado com sua topografia natural, tal como estava naquela data, antes de iniciar qualquer obra de terraplenagem na localidade.

Com essas hipóteses, a bacia do rio Iguaçu é submetida às Chuvas de Projeto, construindo três cenários de impermeabilização do solo do terreno:

No Primeiro Cenário o terreno é considerado como um terreno natural, com um coeficiente de *runoff*¹ de 0,50, típico coeficiente de terreno desocupado.

No Segundo Cenário o terreno é suposto ter um coeficiente de *runoff* de 0,75, representando uma ocupação industrial do terreno com mediana densidade ocupacional.

¹ Coeficiente de *runoff* ou de escoamento superficial representa a capacidade de geração de escoamentos superficiais em uma determinada superfície onde ocorre uma precipitação, sendo sensível ao grau de impermeabilização do terreno.

No Terceiro Cenário o terreno é suposto ter o mesmo coeficiente de *runoff* de 0,75, porém com uma ocupação feita sobre um aterro da gleba.

Para os três cenários de ocupação, o nível d'água (NA) do rio Iguaçu, no trecho entre a Ponte Ferroviária e a BR040, permanece bem próximo a 1,68 metros, quando a chuva na bacia tem um Tempo de Recorrência de 10 anos. Similarmente, para uma chuva de TR de 25 anos, o valor do NA permanece próximo à 1,81m. Já para TR de 50 anos, os dois primeiros cenários mostram NA de 1,91m e o terceiro cenário eleva o NA para 1,93m.

Assim sendo, vê-se que o grau de impermeabilização do terreno pouco afeta o nível d'água máximo (NA_{max}) do rio Iguaçu, muito embora afete o volume de água em trânsito no rio. Isso significa que o grau de impermeabilização do terreno poderá afetar o sistema de microdrenagem que porventura venha a ser construído no terreno e o futuro projeto de microdrenagem desse vasto terreno deve levar isso em conta.

Sob o ponto de vista conceitual, esses resultados eram esperados, pois a área do terreno, embora muito grande, não é uma área significativa quando comparada a área total da bacia, ou mesmo frente a área já urbanizada e impermeabilizada na bacia. Além disso, conforme introduzido na resposta à questão 1, a infiltração é um processo lento, que ocorre em um tempo longo, incompatível com as respostas mais urgentes relacionadas ao mais rápido movimento das águas superficiais que geram as inundações. Ademais, é provável que o valor do coeficiente de escoamento superficial seja ainda maior que o adotado para as simulações na situação natural, por conta da característica local de área úmida. Áreas naturais úmidas têm coeficiente de escoamento superficial semelhante ao de áreas impermeabilizadas (uma vez que a capacidade de infiltração é atingida, ocorre apenas uma infiltração residual, associada à velocidade de infiltração básica).

O espaço do Campo do Bomba é muito importante para ajudar a equacionar os alagamentos da macrorregião, como proposto pela APA, mas não pela sua capacidade de infiltração e sim por oferecer espaço para um canal de interligação.

2. Estudos Quantitativos de Chuva, Vazão e Níveis D'água

Esse capítulo abrange todos os estudos técnicos, hidrológicos e hidrodinâmicos, necessários para o conhecimento dos valores das chuvas de projeto e dos valores característicos das vazões fluviais sob essas chuvas.

Para estudar os eventos naturais de inundação e sua relação com o ambiente construído, foram analisadas as três clássicas situações de chuvas, a saber: (1) Chuva de tempo de recorrência (TR) de 10 anos, para análise dos possíveis alagamentos dos pisos das ruas; (2) Chuva de TR de 25 anos para análise de possíveis alagamentos de casas e quarteirões da zona urbana; e (3) Chuva de TR de 50 anos para análise das graves consequências dessas tempestades, quando desastres mais graves se materializam.

A partir desse estudo hidrológico, esse capítulo apresenta todo o processo de modelagem matemática que será utilizado para avaliação das inundações da bacia do rio Iguaçu-Sarapuí, em seu trecho final, no município de Duque de Caxias, RJ.

Finalmente, a partir desses fluxos modelados o capítulo apresenta os comportamentos hidráulicos esperados nos níveis d'água dos trechos de rio em estudo, de modo a permitir a avaliação dos efeitos do Campo do Bomba sobre as inundações da macrorregião.

2.1. Estudos Hidrológicos

A obtenção das chuvas de projeto foi baseada no estudo de chuvas intensas para as bacias dos rios Iguaçu e Sarapuí, realizado pelo laboratório de Hidrologia da COPPE / UFRJ, “*Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Iguaçu-Sarapuí*”, em novembro de 1994, apresentado no relatório Estudos Hidrológicos – Volume I (IG-RE-009-R1).

Foram utilizados neste estudo os postos pluviográficos de Nova Iguaçu e de Xerém, e os postos pluviométricos de Bangu e de São Bento. Estes postos foram escolhidos por representarem as características das chuvas intensas na região e por possuírem histórico adequado para o estabelecimento das equações de chuvas intensas. A influência que cada posto exerce sobre a bacia do rio Sarapuí e do rio Iguaçu está apresentada na Tabela 2.1. A localização destes postos é apresentada na Figura 2.1.

Tabela 2.1 – Coeficientes de ponderação dos postos utilizados no estudo.

Bacia	Área (km ²)	Pesos (%)			
		São Bento	Nova Iguaçu	Xerém	Bangu
Rio Sarapuí	161,47	0,270	0,322	0,047	0,360
Rio Iguaçu	726,85	0,244	0,615	0,086	0,054

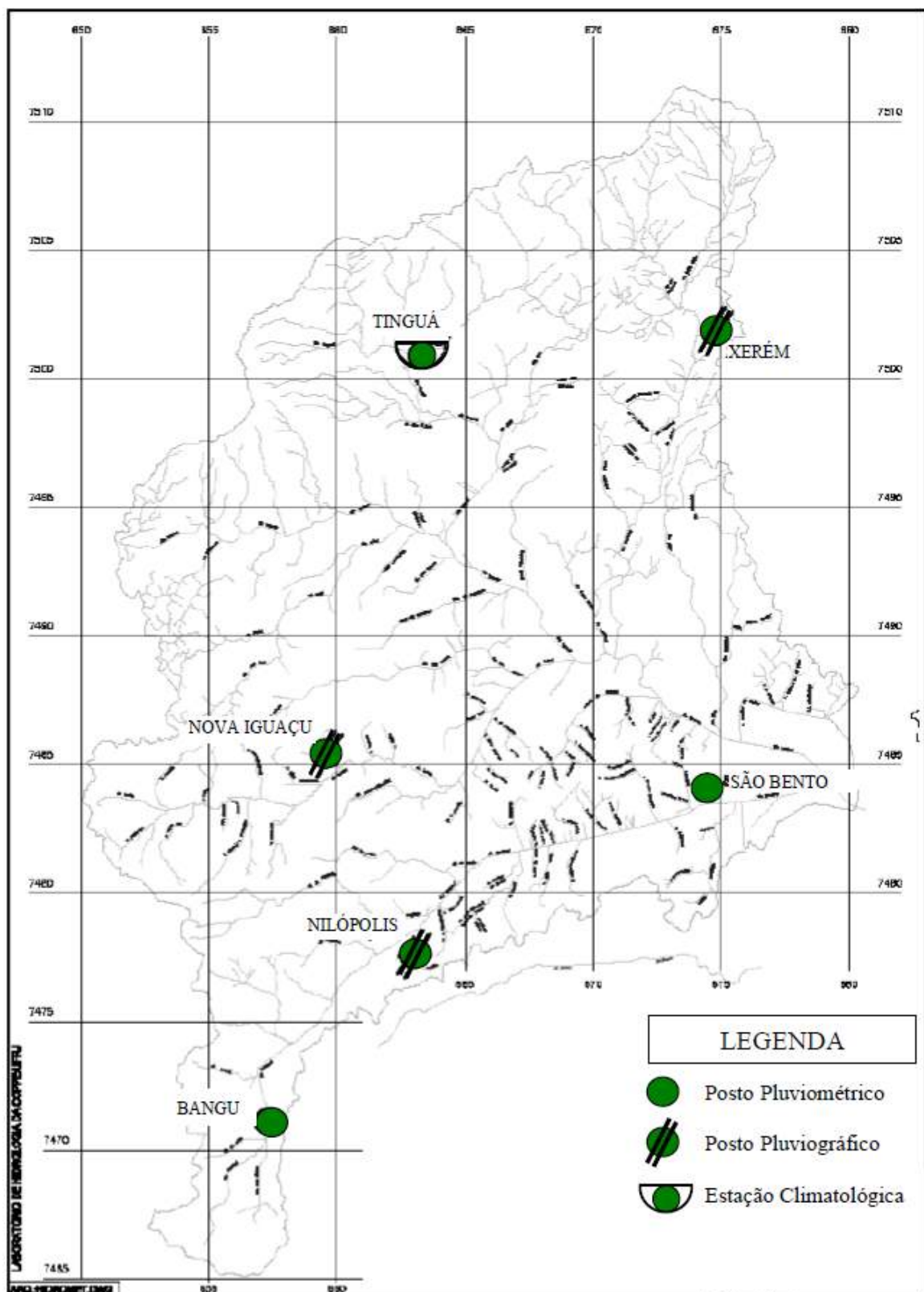


Figura 2.1 - Localização dos postos de chuva utilizados para o estudo hidrológico (LABHID, 1996)

A Figura 2.2 e a Figura 2.3 apresentam relações precipitação-duração-frequência para as chuvas intensas de Bangu e de São Bento para tempos de duração de 1 h até 1 dia e tempos de recorrência de 5, 10, 20, 50 e 100 anos.

Duração (horas)	Tempo de Recorrência (anos)				
	5	10	20	50	100
1	64,2	73,0	80,6	93,4	101,7
2	78,5	90,5	101,3	117,6	128,8
3	86,9	100,7	113,3	131,7	144,6
4	92,9	107,9	121,9	141,7	155,8
5	97,5	113,6	128,5	149,5	164,5
6	101,3	118,1	134,0	155,8	171,6
7	104,5	122,0	138,5	161,2	177,6
8	107,2	125,4	142,5	165,9	182,8
9	109,7	128,4	146,0	170,0	187,4
10	111,8	131,0	149,2	173,6	191,5
11	113,8	133,4	152,0	176,9	195,2
12	115,6	135,6	154,6	180,0	198,6
13	117,3	137,6	157,0	182,8	201,7
14	118,8	139,5	159,2	185,3	204,6
15	120,2	141,2	161,2	187,7	207,3
24 horas	129,9	153,1	175,3	204,0	225,6
1 dia	118,09	139,14	159,34	185,48	205,07

Figura 2.2 - Estação pluviométrica de Bangu (LABHID, 1996)

Duração (horas)	Tempo de Recorrência (anos)				
	5	10	20	50	100
1	65,7	74,4	81,9	94,7	102,9
2	80,4	92,2	102,9	119,2	130,3
3	89,0	102,6	115,2	133,5	146,3
4	95,1	110,0	123,9	143,6	157,6
5	99,8	115,7	130,6	151,5	166,4
6	103,6	120,4	136,1	157,9	173,6
7	106,9	124,4	140,8	163,4	179,7
8	109,7	127,8	144,8	168,1	185,0
9	112,2	130,8	148,4	172,2	189,6
10	114,5	133,5	151,6	175,9	193,8
11	116,5	136,0	154,5	179,3	197,5
12	118,3	138,2	157,1	182,4	200,9
13	120,0	140,3	159,5	185,2	204,1
14	121,6	142,2	161,8	187,8	207,0
15	123,1	144,0	163,8	190,3	209,8
24 horas	132,9	156,0	178,1	206,8	228,2
1 dia	120,86	141,83	161,93	187,96	207,47

Figura 2.3 - Estação pluviométrica de São Bento (LABHID, 1996)

As equações de chuvas intensas de Nova Iguaçu e de Xerém foram estabelecidas associando-se a intensidade da chuva à sua duração, para cada tempo de recorrência. Desta forma, foram ajustadas equações do tipo:

$$i = \frac{A}{(t + t_0)^b} \quad (4)$$

Na qual:

i – intensidade, em mm/h;

t – duração da precipitação, em min;

A, t_0 e b – parâmetros ajustados para cada tempo de recorrência.

A Figura 2.4 e a Figura 2.5 apresentam os parâmetros das equações de chuvas intensas de Nova Iguaçu e de Xerém para os tempos de recorrência de 5, 10, 20, 50 e 100 anos.

Parâmetros	Tempo de Recorrência (anos)				
	5	10	20	50	100
A	1257	1348	1422	1521	1605
b	0,7633	0,7544	0,7488	0,7347	0,7299
t_0	6	6	6	6	6

Figura 2.4 - Parâmetros da equação de chuvas intensas para a estação de Nova Iguaçu (LABHID, 1996)

Parâmetros	Tempo de Recorrência (anos)				
	5	10	20	50	100
A	1059	1047	1043	1058	1078
b	0,6754	0,6464	0,6232	0,6006	0,5873
t_0	14	14	14	14	14

Figura 2.5 - Parâmetros da equação de chuvas intensas para a estação de Xerém (LABHID, 1996)

A partir desses parâmetros foram calculadas chuvas para diferentes tempos de recorrência, com durações iguais aos tempos de concentração da bacia do Iguaçu ($t_c = 15,80$ h) e da bacia do rio Sarapuí ($t_c = 10,80$ h), estimados por LABHID (1996). A chuva de projeto assume como hipótese uma distribuição uniforme no espaço.

Na Tabela 2.2 estão apresentados os valores absolutos da lâmina de chuva em milímetros precipitada em cada evento, com tempos de recorrência de 10, 25 e 50 anos.

Tabela 2.2 – Dados Hidrológicos e Chuva de Projeto para cada Bacia

Dados Hidrológicos					
Bacia Hidrográfica	Área Total (km²)	Duração da chuva	Chuva de Projeto		
			TR 10 anos	TR 25 anos	TR 50 anos
Sarapuí	161,47	10,80 horas	127,70 mm	150,04 mm	167,70 mm
Iguaçu	726,85	15,80 horas	149,91 mm	157,80 mm	175,80 mm

2.2. Estudos Hidrodinâmicos

Nesse item é apresentado o processo de modelagem matemática utilizado para avaliação das inundações da bacia do rio Iguaçu-Sarapuí, em seu trecho final, no município de Duque de Caxias, RJ.

Primeiramente, essa fase visa compreender o funcionamento do sistema de drenagem local, considerando a situação atual do sistema de macrodrenagem. Esse diagnóstico possibilita a análise das vazões e dos níveis máximos alcançados durante os eventos de cheia dos rios da bacia estudada. Os resultados iniciais permitirão estimar as cotas máximas de nível d'água ao longo do curso principal dos rios e canais, bem como de suas planícies de inundação, para a situação atual, devido a ocorrência das chuvas de projeto selecionadas. Com esses resultados, determinam-se as cotas de inundação nas regiões de baixada da bacia, localizadas no município de Duque de Caxias.

Os dados topográficos foram obtidos de um conjunto de plantas na escala 1:10.000 e 1:2.000, referentes ao levantamento realizado pela fundação CIDE em 1996, abrangendo todo a bacia. Também foram utilizadas seções de projeto dos rios Iguaçu, Botas e Sarapuí provenientes dos estudos iniciais da bacia, realizados pelo Laboratório de Hidrologia e Meio Ambiente da COPPE, datados de novembro de 2007 para a 1ª Fase do Projeto Iguaçu (COPPE/COPPETEC, 2009).

A partir das informações topográficas, a bacia foi subdividida em células de escoamento, que, interligadas entre si por equações hidráulicas, simulam o funcionamento da bacia durante eventos de cheias fluviais. O modelo completo possui 1549 células de escoamento, entre células representativas das planícies e dos rios/canais, abrangendo toda a bacia do rio Iguaçu-Sarapuí. Essa divisão pode ser vista na Figura 2.6.

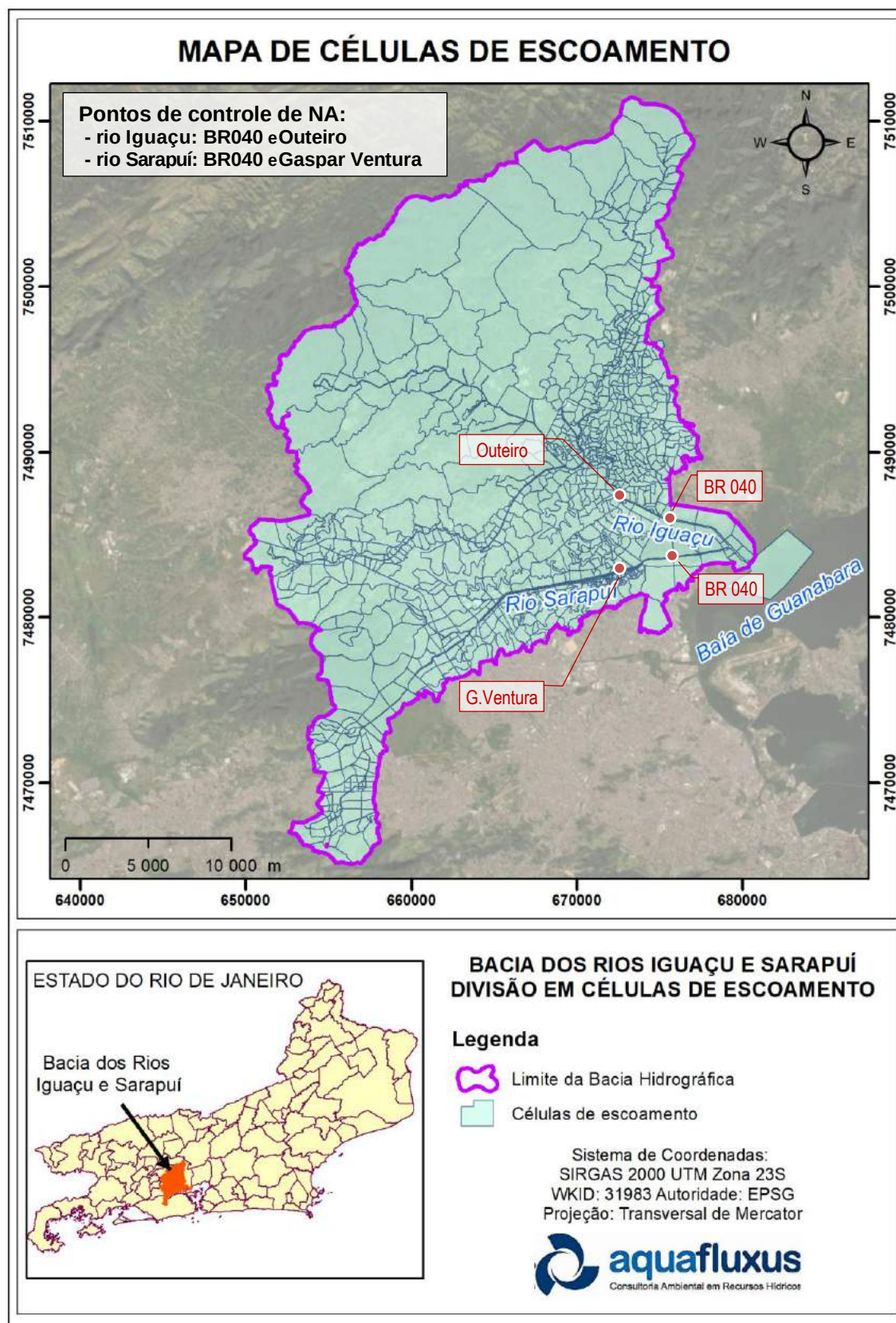


Figura 2.6 – Discretização da bacia do rio Iguaçu-Sarapuí a ser modelada em células de escoamento

Após a elaboração da divisão de células e da configuração do consequente esquema topológico, composto por uma matriz de células que define as suas posições relativas e ligações para fins de cálculo de escoamentos, foi montada a base de dados para entrada no modelo matemático, composta de:

- Arquivo de Dados Iniciais, contendo as informações referentes ao arranjo geral das células e ao estado inicial de alagamento das células que compõem a bacia modelada.
- Arquivo de Características das Células, com os dados específicos das células e suas ligações com as vizinhas. Entre eles cota, área e runoff médio calculados conforme mapeamento de uso de solos apresentado nos estudos hidrológicos.
- Arquivos de Precipitação, indicando a chuva sobre cada célula da área modelada, dependendo da distribuição espacial da rede pluviométrica. Foram consideradas as chuvas de projeto do relatório da hidrologia, com os TR de 10, 25 e 50 anos.
- Arquivos de Condições de Contorno, como função da rede hidrométrica disponível nos limites físicos estabelecidos para o modelo. Neste estudo, a condição de contorno para os níveis d'água da Baía de Guanabara foi considerada curva de maré utilizada no Plano Diretor de Recursos Hídricos, Controle de Inundações e Recuperação Ambiental da Bacia dos rios Iguaçu/Sarapuí (Relatório PDIS-RE-002-R1 – COPPE/COPPETEC, 2009). Assim, foi estabelecida para condição de contorno de jusante, uma curva de maré na foz do rio Iguaçu-Sarapuí com nível d'água máximo na cota de 0,60 m, conforme a Figura 2.7.

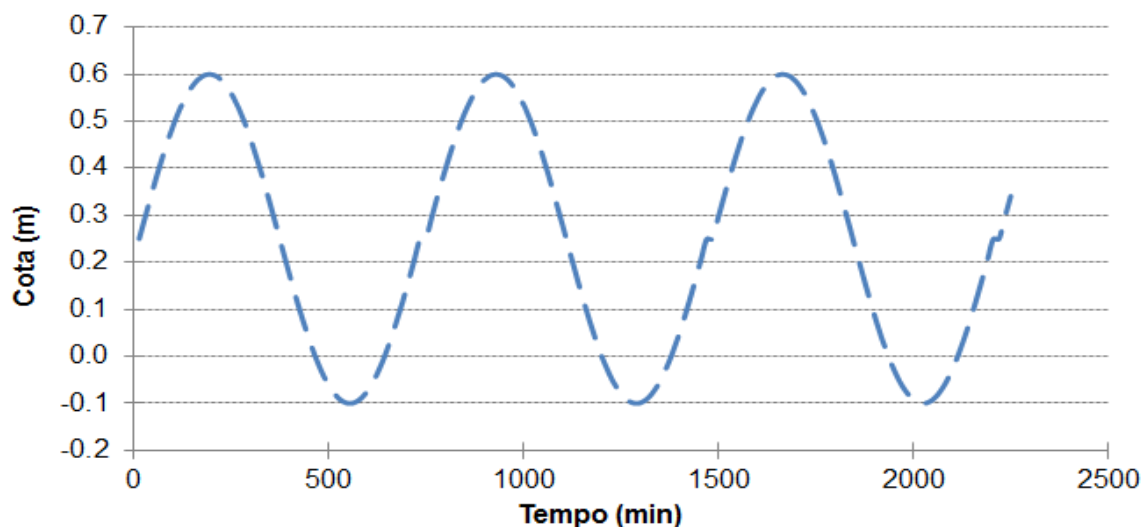


Figura 2.7 - Curva de maré considerada para condição de contorno da Baía de Guanabara

2.2.1. Calibração

Para calibrar o modelo da Bacia do rio Iguaçu-Sarapuí, Sousa (2010) e Marques *et. al* (2017) utilizaram o evento de chuva ocorrido entre os dias 30 e 31 de dezembro de 2009, entre às 18h30min do dia 30 e às 9h15min do dia 31 e contaram com dados de chuva e níveis do Sistema de Alerta da Baixada Fluminense, disponibilizados pelo INEA, e com medições de níveis máximos levantadas em campo. Os resultados da calibração demonstraram a capacidade do modelo em representar as cheias na bacia (SOUSA, 2010; MARQUES *et al.*, 2017²).

Para calibração da sub-bacia do rio Sarapuí foi considerada a calibração realizada para o projeto “Modelação Matemática da Bacia do Pôlder Alberto de Oliveira, com a Modelação Parcial do Rio Sarapuí ao Longo da Extensão do Canal Auxiliar”, desenvolvido pela COPPE no decorrer dos anos de 2002 e 2003 (COPPE/COPPETEC, 2009).

2.2.2. Cenário de Simulação

Com o modelo de células da bacia do rio Iguaçu-Sarapuí construído e calibrado é possível simular os efeitos da ligação por um canal de 50 metros de largura média, entre o rio Iguaçu e o Sarapuí, para diferentes situações de chuva, comparando os dois cenários: COM e SEM canal de ligação.

² Artigo aprovado para publicação no XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (XXII-SBRH) da Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH).

Muito embora saibamos que a influência da ligação proposta para os rios Iguaçu e Sarapuí chega a atingir esses rios a uma distância de cerca de 10 quilômetros à montante da BR-040, nesse relatório, a análise dos efeitos desse canal de ligação será direcionada para a região mais frágil da macrorregião, sob o ponto de vista de inundação. E essa região mais frágil localiza-se nas margens do rio Iguaçu, no trecho entre o Pôlder do Outeiro e a BR-040.

Os efeitos do canal de ligação sobre o fluxo das águas no rio Iguaçu serão analisados colocando a bacia do Iguaçu sob três tempestades clássicas, com duração igual ao tempo de concentração do rio analisado e Tempos de Recorrência de 10, 25 e 50 anos. Nesses três casos a bacia do Sarapuí estará sob uma chuva de ocorrência anual.

Similarmente, os efeitos do canal de ligação sobre o fluxo das águas no rio Sarapuí serão analisados colocando a bacia do Sarapuí sob três tempestades, com duração igual ao tempo de concentração do rio analisado e Tempos de Recorrência de 10, 25 e 50 anos. Nesses três casos a bacia vizinha, do Iguaçu, estará sob uma chuva de ocorrência anual.

Essas considerações têm por finalidade analisar uma situação de estresse na bacia sob observação, recebendo as chuvas de projeto construídas, conforme descrito anteriormente, representando a criticidade para a microdrenagem (TR de 10 anos), para a macrodrenagem (TR de 25 anos) e para a verificação de eventos extremos (TR de 50 anos), considerando que a bacia vizinha também está recebendo uma chuva expressiva (TR de 1 ano), mas não crítica. O reconhecimento de que a chuva tem variações espaciais e de que a combinação crítica em duas bacias vizinhas, ao mesmo tempo, na verdade, representa uma recorrência maior que a consideração nominal, motivou essa escolha.

Para todas essas simulações, serão realizadas as comparações desses fluxos em dois cenários físicos da bacia:

- O primeiro é o cenário atual, **sem** o canal de ligação entre os rios; e
- O segundo na situação de projeto **com** o referido canal de ligação.

2.2.3. Resultados

Esse item apresenta os resultados das simulações realizadas, comparando a situação atual com o cenário de projeto, no qual é construído um canal de interligação entre os rios Iguaçu e Sarapuí, nas proximidades de sua foz. Isto é, sempre comparando os níveis d'água dos rios, **sem** e **com** o canal de interligação.

Os resultados da modelagem da bacia são níveis d'água ao longo dos rios da bacia, com os quais é possível a produção de gráficos com a variação temporal de níveis de água (Cotagramas) para os tempos de recorrência analisados.

Nesse item, os cotagramas dos rios Iguaçu e Sarapuí são analisados nos quatro pontos de controle, descritos na Figura 3.1, que definem os dois trechos mais críticos, a saber:

- Trecho mais crítico do rio Iguaçu: entre a BR040 e o Pôlder Outeiro
- Trecho mais crítico do rio Sarapuí: entre a BR040 e o Canal Gaspar Ventura

Primeiramente, as três tempestades de projeto (TR 10, 25 e 50) ocorrerão somente na bacia do rio Sarapuí, sendo que, na bacia do Iguaçu, ocorrerão chuvas de recorrência anual. Nessa situação serão apresentadas, para cada uma das três tempestades:

- Os cotagramas (curvas de nível d'água) nos quatro pontos de controle;
- Os perfis longitudinais dos rios Iguaçu e Sarapuí;
- As manchas de inundação ao longo dos rios Iguaçu e Sarapuí;
- A melhoria na mancha de inundação nesses rios.

Em seguida, e de forma similar, essas três tempestades ocorrerão somente na bacia do rio Iguaçu, com a bacia do Sarapuí sob chuvas de recorrência anual.

2.2.3.1. Resultados para chuvas críticas na bacia do rio Sarapuí

Esse item apresenta as curvas de nível d'água nos rios Iguaçu e Sarapuí quando a bacia do Sarapuí estiver sujeita a tempestades de TR 10, 25 e 50 e a bacia do Iguaçu estiver com chuvas de recorrência anual. Nessa situação, a cheia do Sarapuí chega rápido ao canal de interligação e logo consegue conduzir suas águas de cheia em direção ao rio Iguaçu, elevando o nível deste rio, que está sob chuva de recorrência anual. A elevação do nível do rio Iguaçu é uma comprovação de que esse rio está “ajudando” a escoar a cheia do Sarapuí.

Com o passar do tempo, essa “ajuda” tende a desaparecer e ambos os rios se equilibram. Essa lógica de funcionamento se repete, com graus diferentes, para as três tempestades testadas (TR 10, 25 e 50), conforme pode ser observado nos inúmeros cotagramas apresentados a seguir.

Todos os cotagramas desse capítulo serão relativos aos trechos mais críticos dos dois rios. Isto é, o trecho do Iguaçu, entre a BR040 e o Outeiro, e o trecho do Sarapuí, entre a BR040 e o Gaspar Ventura.

2.2.3.1.1. Bacia do rio Sarapuí com chuva de TR de 10 anos.

Os gráficos a seguir apresentam esse fenômeno ocorrendo para uma chuva de TR 10 anos sobre a bacia do Sarapuí. Da Figura 2.8 à Figura 2.11 são exibidos os resultados de níveis de água dos quatro trechos mais críticos, com o Sarapuí sob uma chuva de 10 anos de recorrência e o Iguaçu com uma chuva constante de recorrência anual.

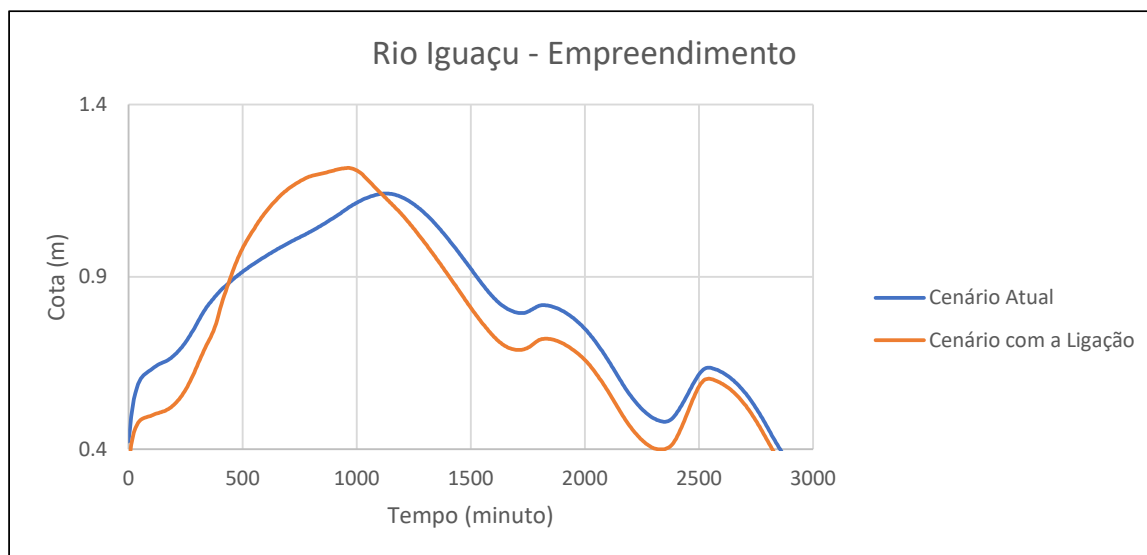


Figura 2.8 – Cotagrama do rio Iguaçu, no trecho do empreendimento

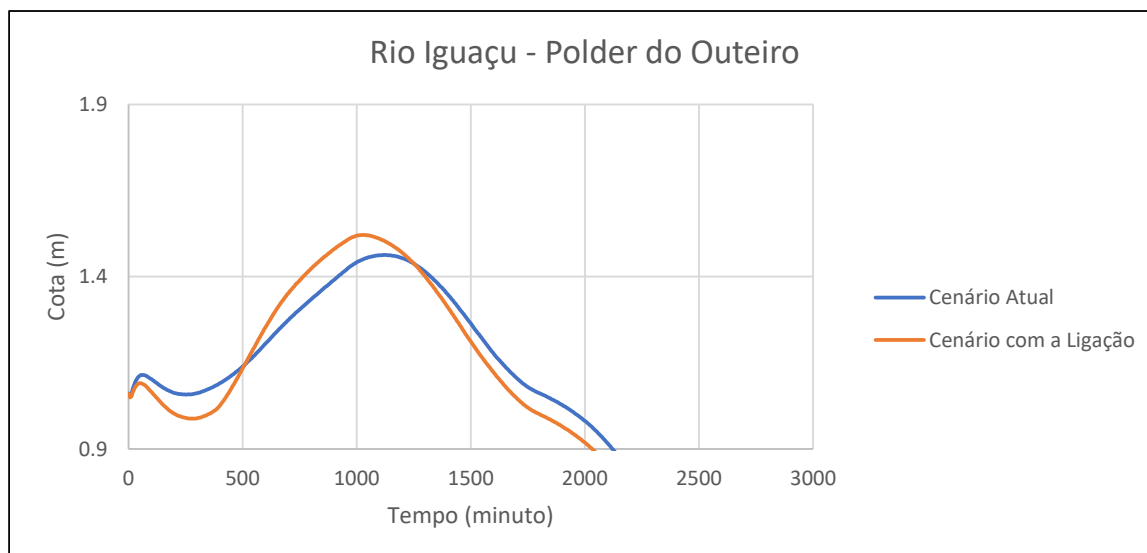


Figura 2.9 - Cotagrama do rio Iguaçu, em frente ao Pôlder do Outeiro

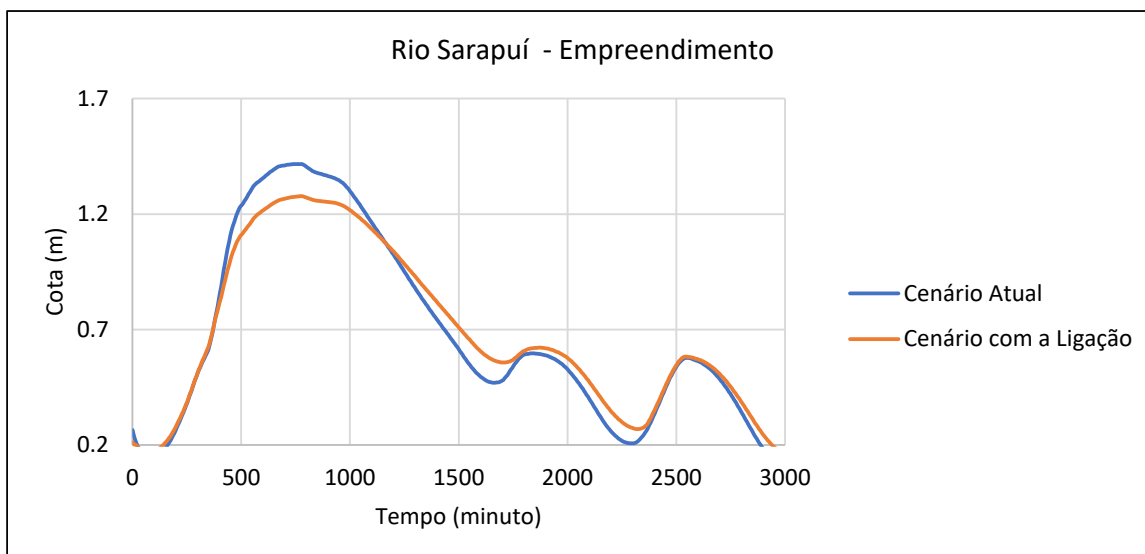


Figura 2.10 - Cotagrama do rio Sarapuí, no trecho do empreendimento

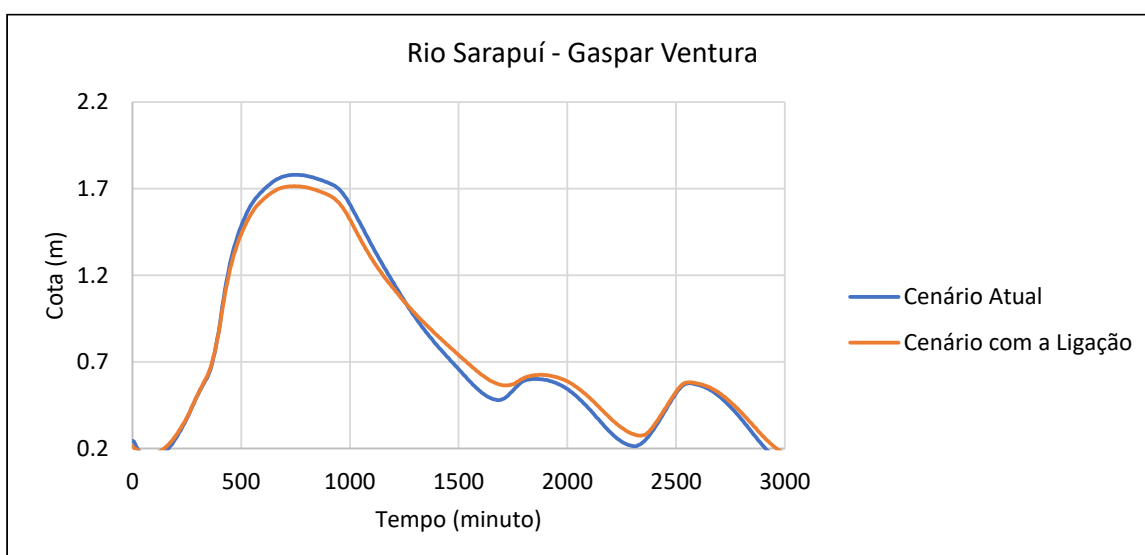


Figura 2.11 - Cotagrama do rio Sarapuí, afluição do Gaspar Ventura

O gráfico da Figura 2.12 apresenta a comparação dos níveis máximos de ambos os rios junto ao empreendimento.

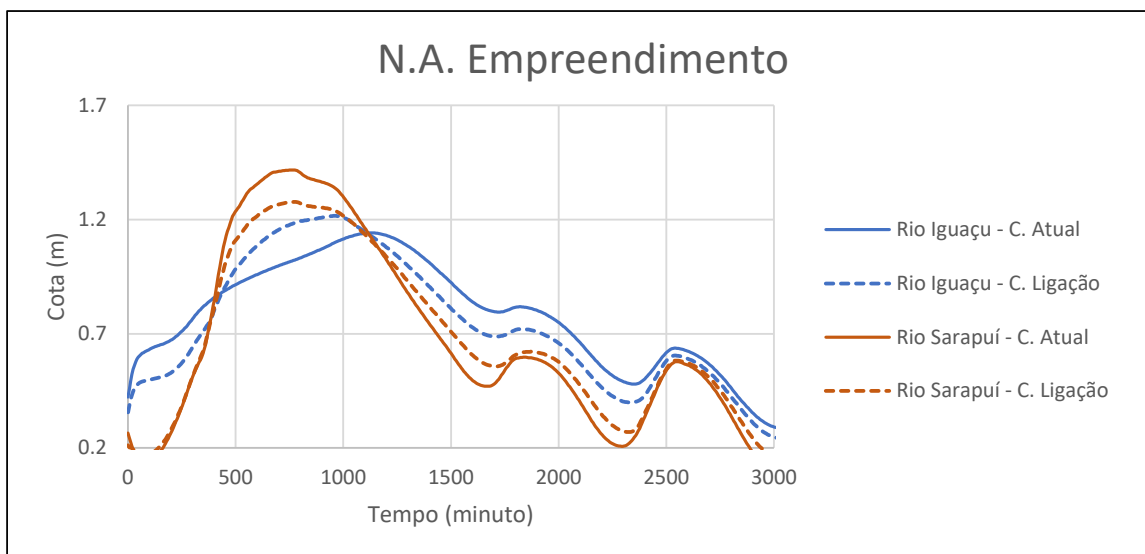


Figura 2.12 – Comparação dos cotogramas dos rios Iguaçu e Sarapuí, no trecho do empreendimento.

A Figura 2.13 e a Figura 2.14 apresentam a diferença no perfil longitudinal dos rios Iguaçu e Sarapuí, respectivamente, para os cenários simulados. Percebe-se, nestas figuras, que o Iguaçu, que não está em situação crítica (chuva de TR 1 ano), tem uma pequena elevação de seu perfil longitudinal, por compartilhar sua foz com o Rio Sarapuí, que está em uma condição crítica. Por sua vez, o perfil de nível d'água do Rio Sarapuí cai, mostrando o resultado positivo que se esperava.

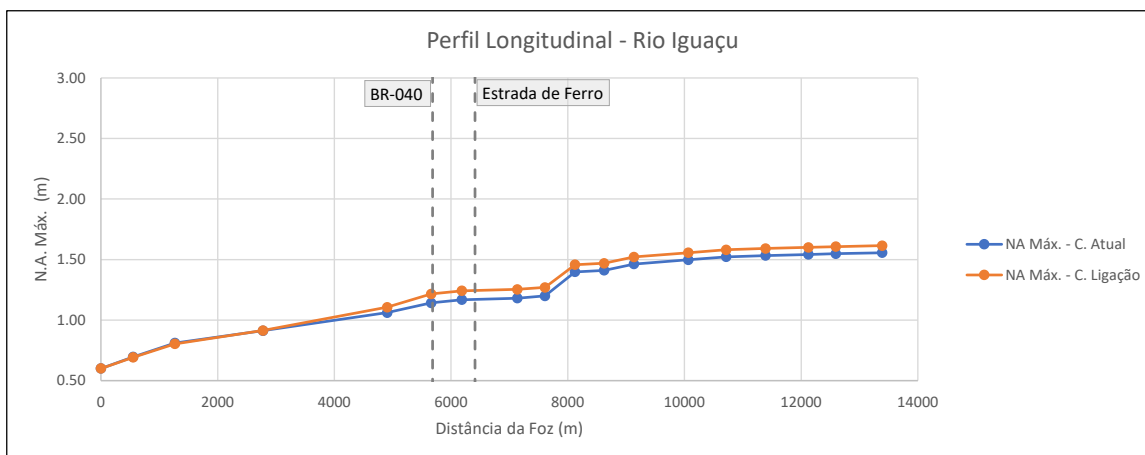


Figura 2.13 – Perfil Longitudinal do rio Iguaçu para o cenário atual e para o cenário com ligação, considerando uma chuva crítica de TR 10 anos na bacia do rio Sarapuí.

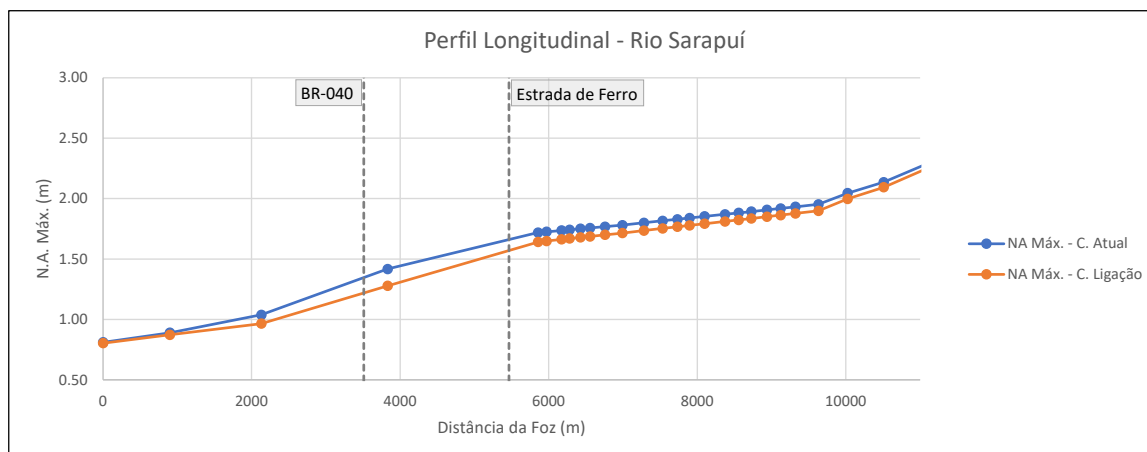


Figura 2.14 – Perfil Longitudinal do rio Sarapuí para o cenário atual e para o cenário com ligação, considerando uma chuva crítica de TR 10 anos na bacia do rio Sarapuí.

Como pode ser verificado nos cotogramas acima, o canal de interligação funciona adequadamente, aliviando a calha do rio Sarapuí. Isso também pode ser verificado pelo perfil longitudinal do rio Sarapuí (Figura 2.14), onde não só se constata o abaixamento do nível d'água, como também demonstra que essa melhora se estende quase até a rodovia Dutra.

Veja que, pelo perfil longitudinal do rio Iguaçu (Figura 2.13), que a água da cheia do Sarapuí foi corretamente levada para o rio Iguaçu, sem afetá-lo, pois, em nenhum momento esse acréscimo gerou extravasamento.

Uma outra forma de analisar a “ajuda” do canal de interligação é utilizando-se dos mapas de manchas de inundação. As figuras a seguir pretendem ilustrar como a mancha de inundação é afetada com a construção do canal. A Figura 2.15 apresenta a mancha de inundação para TR=10 sem o canal e a Figura 2.16 apresenta a mancha com a inclusão do canal.

Finalmente, a Figura 2.17 apresenta as diferenças nos níveis d'água máximos das duas manchas.

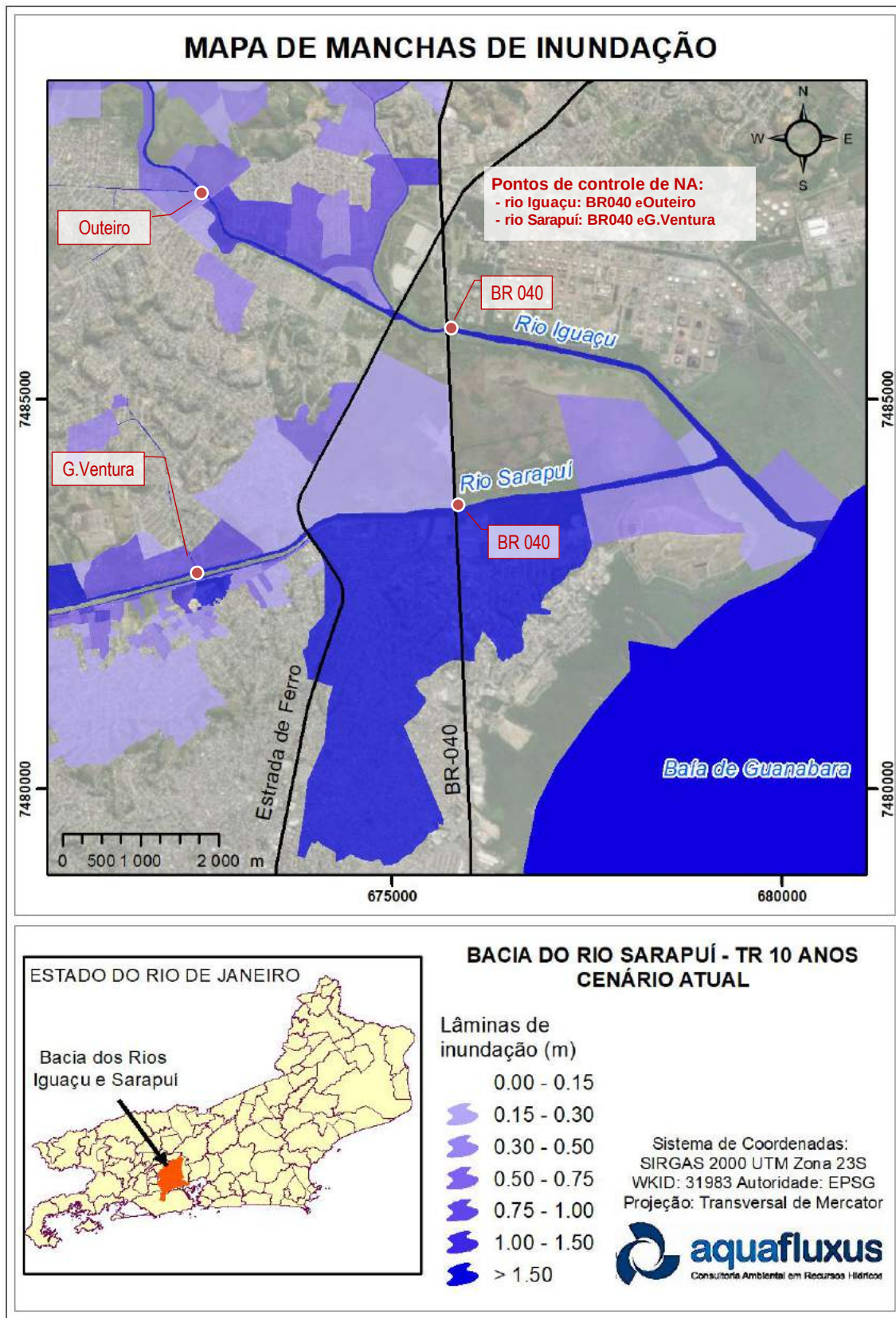


Figura 2.15 – Mancha de inundação do Cenário Atual para a chuva na bacia crítica na bacia do rio Sarapuí com Tempo de Recorrência de 10 anos.

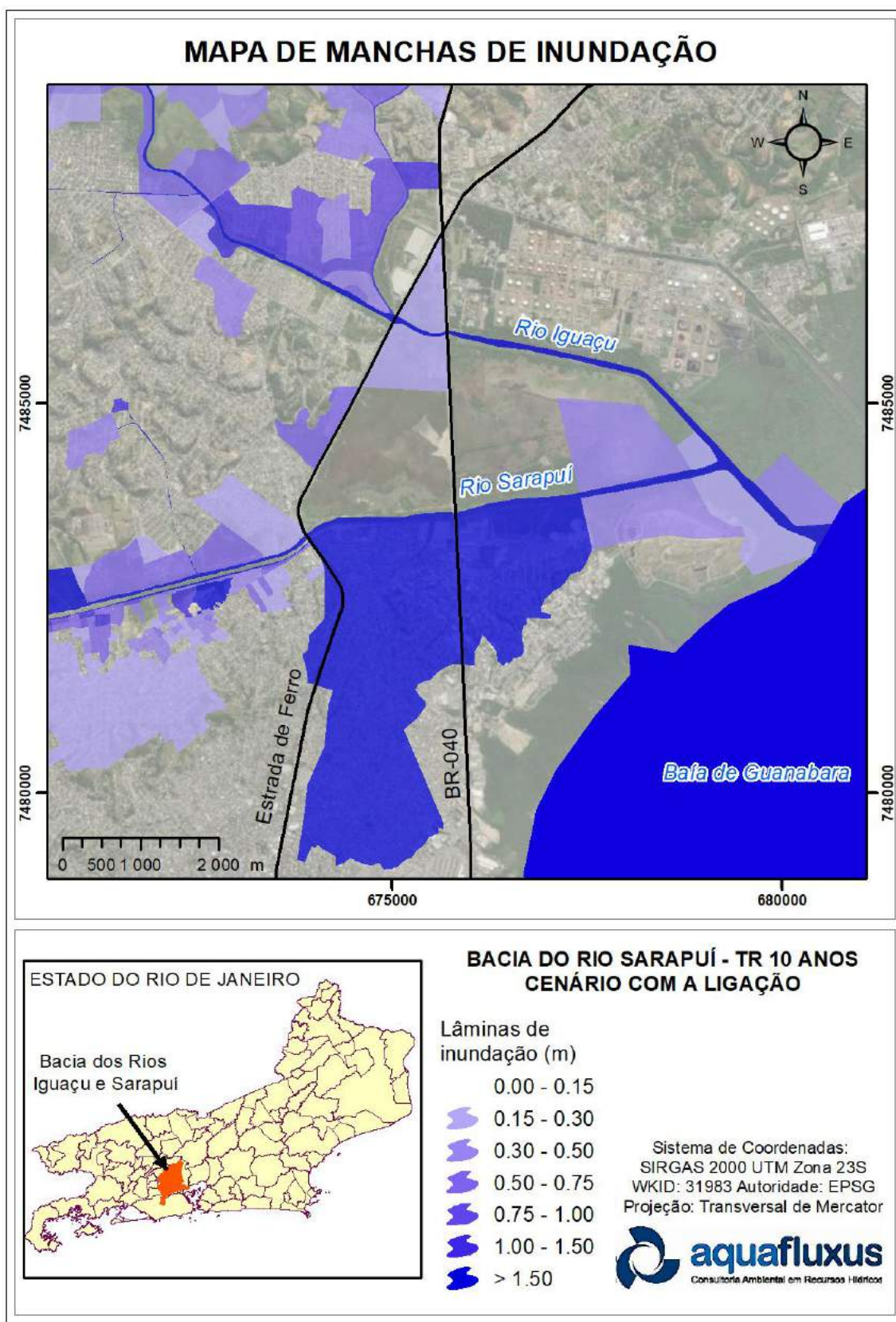


Figura 2.16 – Mancha de inundação do Cenário com ligação para a chuva na bacia crítica na bacia do rio Sarapuí com Tempo de Recorrência de 10 anos.

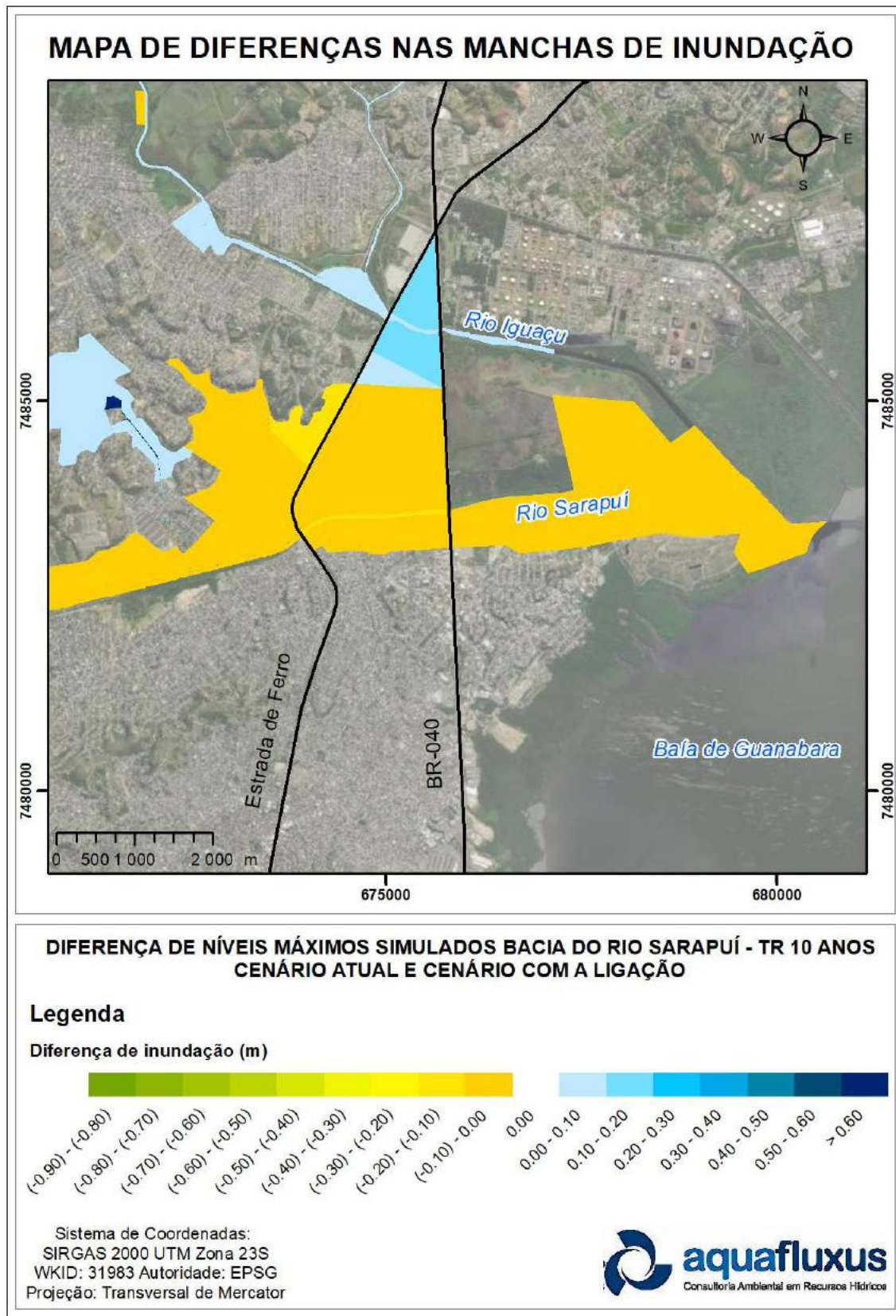


Figura 2.17 – Comparação entre a diferença nos alagamentos para os cenários simulados considerando uma chuva crítica na bacia do rio Sarapuí com Tempo de Recorrência de 10 anos.

Conclusão: Esses resultados mostram que os níveis máximos no rio Sarapuí têm uma redução entre 14cm (junto ao empreendimento) e 7cm (junto ao G.Ventura), gerando uma elevação no rio Iguaçu que varia entre 7cm (junto ao empreendimento) e 6cm (junto ao Outeiro).

Ao se analisar os níveis d'água do rio Sarapuí quando essa bacia está sujeita a temporais, podemos concluir que o canal de interligação possibilita as seguintes reduções de NA nos dois pontos de controle mais críticos observados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Avaliação dos efeitos do canal de ligação.

Funcionamento do canal para uma chuva na bacia do rio Sarapuí				
Temporais na bacia do Sarapuí		TR 10	TR 25	TR 50
Pontos de Controle	Junto a BR 040	Abaixa 14 cm	-	-
	Junto ao Canal Gaspar Ventura	Abaixa 07 cm	-	-

2.2.3.1.2. Bacia do rio Sarapuí com chuva de TR de 25 anos.

Esse item repete o mesmo procedimento do item anterior, alterando-se tão somente a chuva que cai sobre a bacia do Sarapuí, que agora será de TR de 25 anos. Da Figura 2.18 à Figura 2.21 são exibidos os resultados de níveis de água dos quatro trechos mais críticos com o Sarapuí sob uma chuva de 25 anos de recorrência e o Iguaçu com uma chuva constante de recorrência anual.

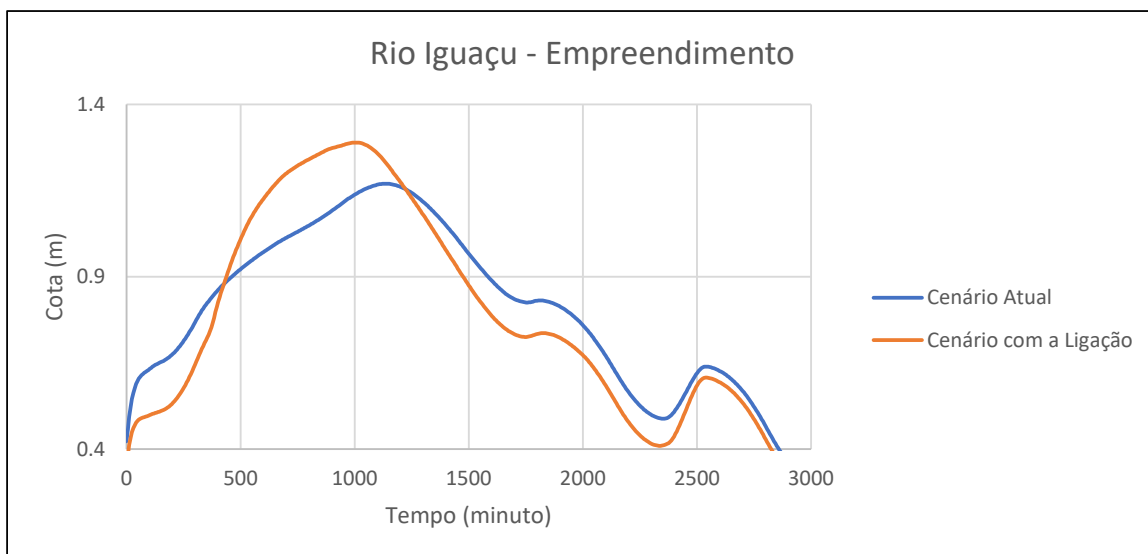


Figura 2.18 - Cotagrama do rio Iguaçu, no trecho do empreendimento

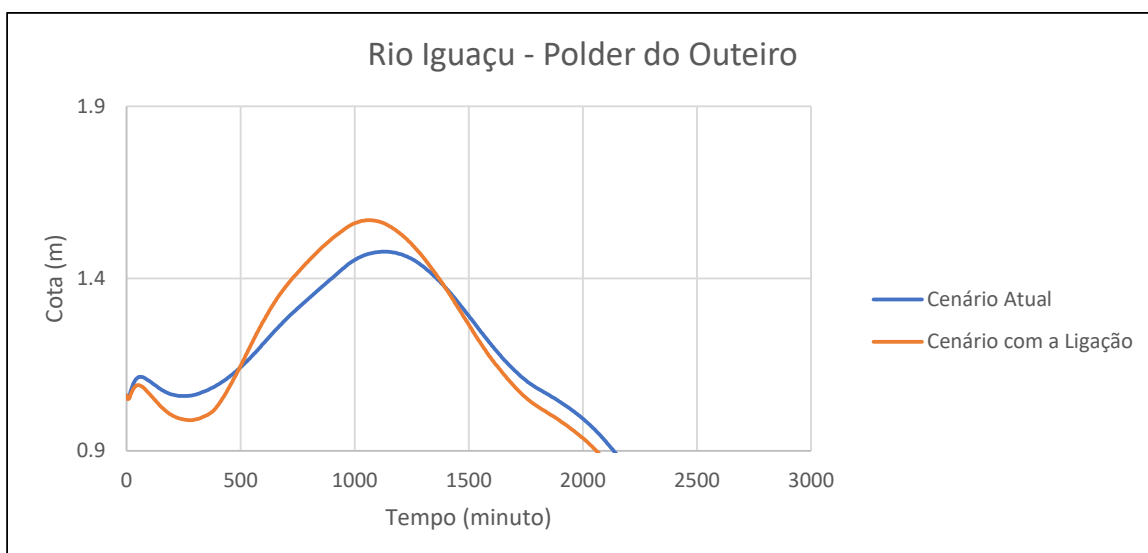


Figura 2.19 - Cotagrama do rio Iguaçu, em frente ao Pôlder do Outeiro

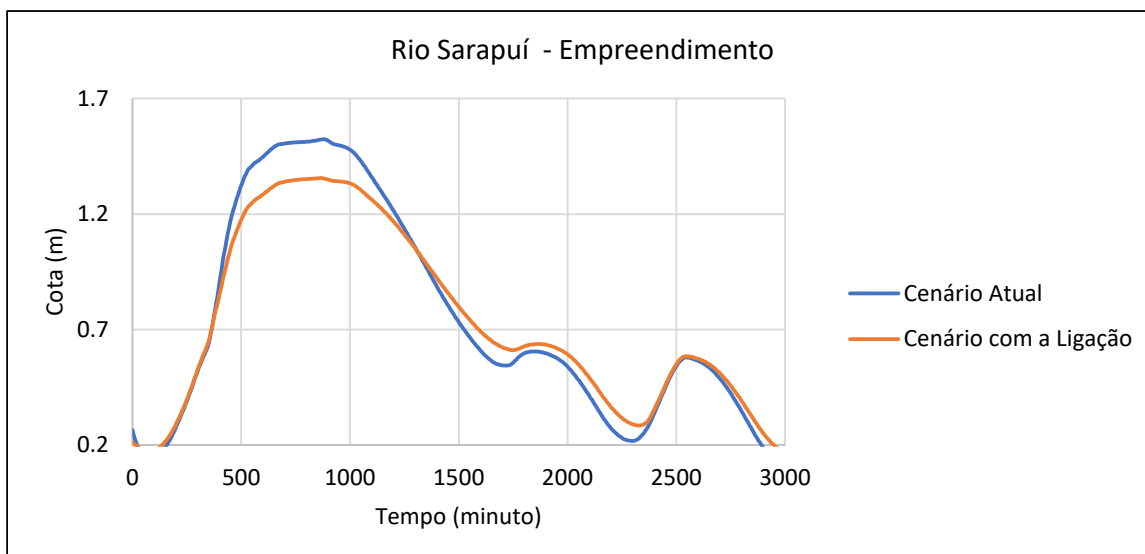


Figura 2.20 - Cotagrama do rio Sarapuí, no trecho do empreendimento

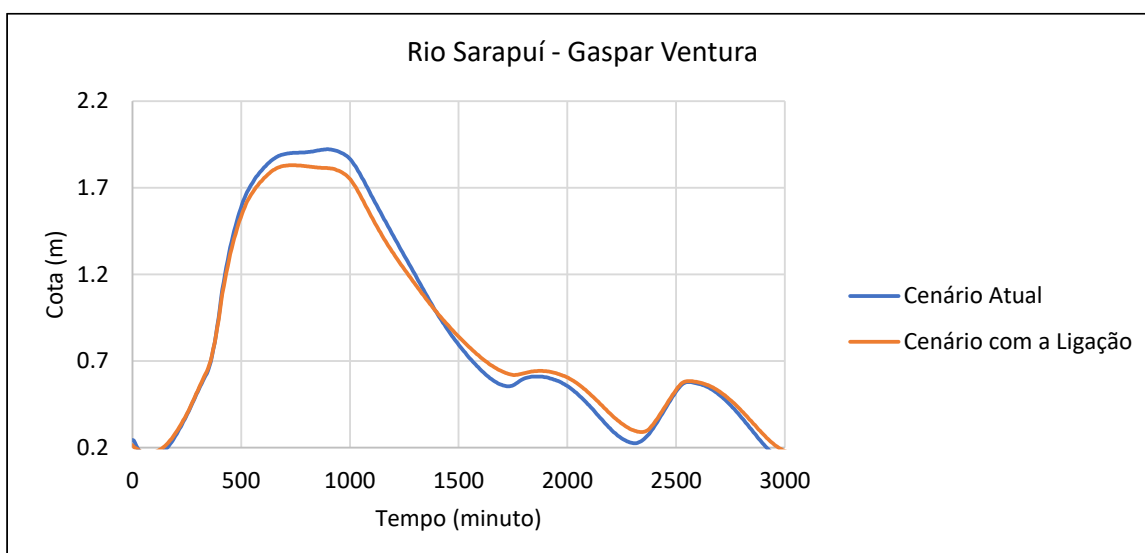


Figura 2.21 - Cotagrama do rio Sarapuí, afluência do Gaspar Ventura

O gráfico da Figura 2.22 apresenta a comparação dos níveis máximos de ambos os rios junto ao empreendimento.

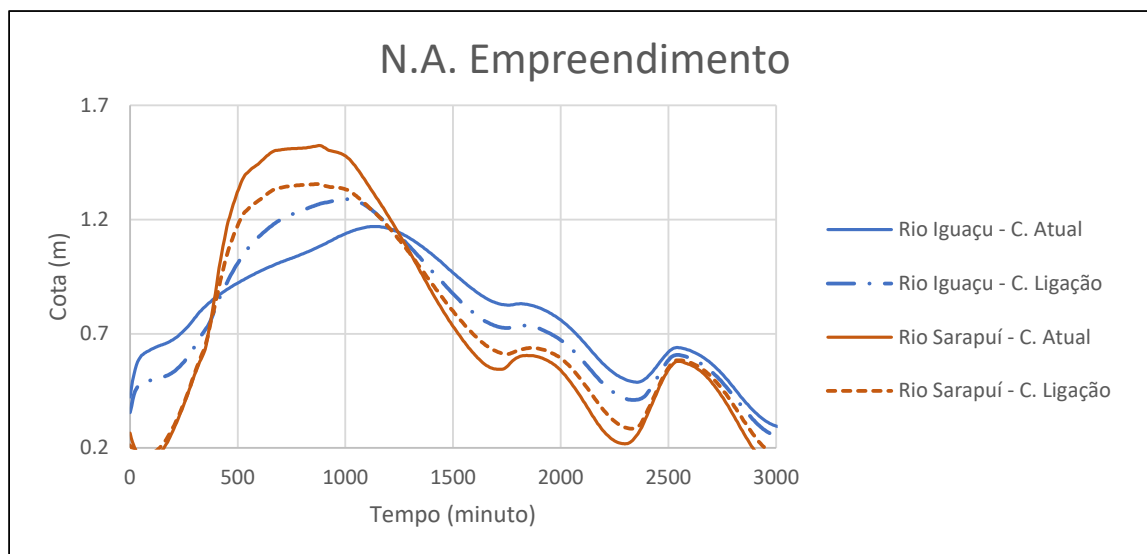


Figura 2.22 – Comparação dos cotogramas dos rios Iguaçu e Sarapuí, no trecho do empreendimento.

Como pode ser verificado nos cotogramas destas figuras, o canal de interligação funciona adequadamente, aliviando a calha do rio Sarapuí, transferindo parte da cheia adequadamente para o rio Iguaçu, que está em uma condição de chuva mais suave. O mesmo também pode ser verificado pelo perfil longitudinal do rio Sarapuí, onde não só se constata o abaixamento do nível d'água, como também demonstra que essa melhora se estende de forma importante quase até a rodovia Dutra. Nota-se, ainda, que o aumento do volume de chuva no Sarapuí faz estender o pico de inundação, que permanece alto até a passagem do pico do Iguaçu, por efeito de remanso. Como destacado na escolha dos cenários de simulação, a chuva de TR de 1 ano no Iguaçu não é considerada crítica, mas é uma chuva importante.

A Figura 2.23 e a Figura 2.24 apresentam a diferença no perfil longitudinal dos rios Iguaçu e Sarapuí para os cenários simulados.

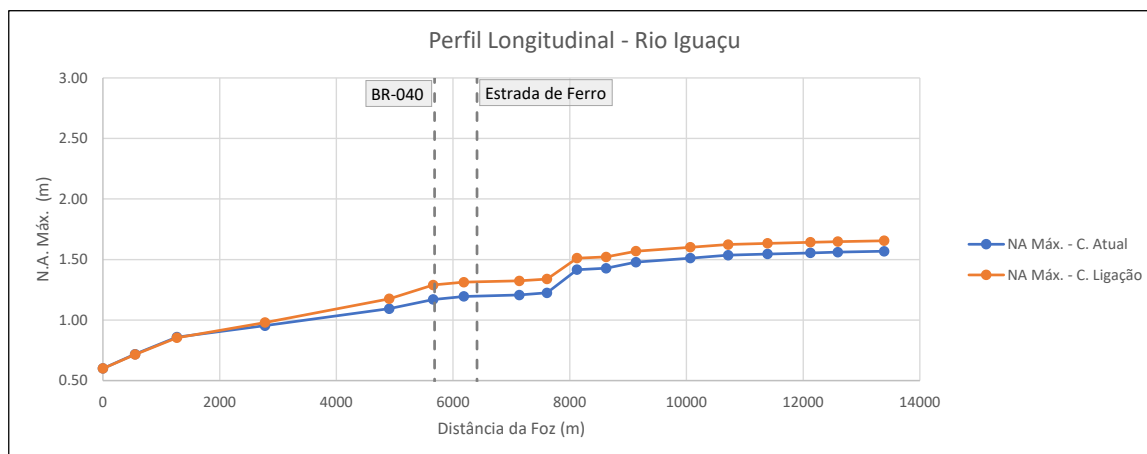


Figura 2.23 – Perfil Longitudinal do rio Iguaçu para o cenário atual e para o cenário com ligação, considerando uma chuva crítica de TR 25 anos na bacia do rio Sarapuí.

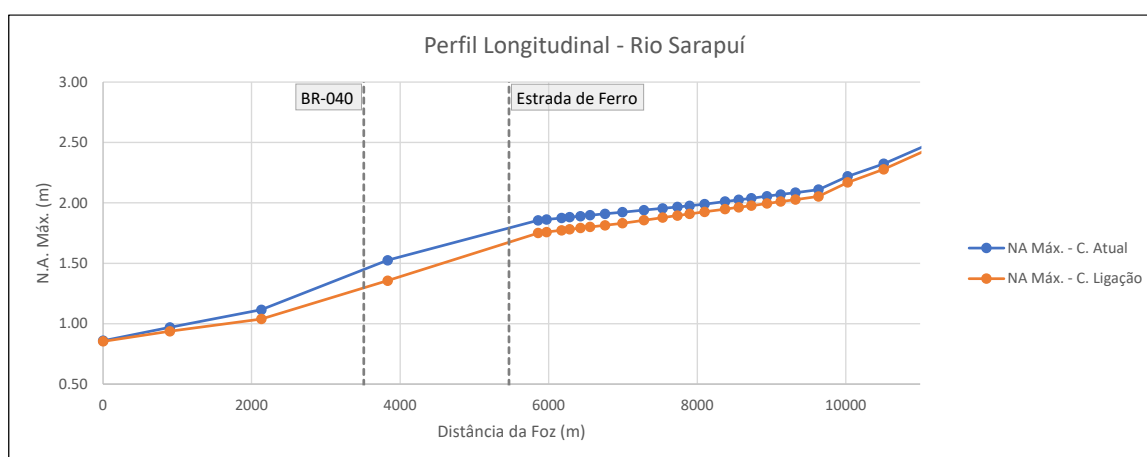


Figura 2.24 – Perfil Longitudinal do rio Sarapuí para o cenário atual e para o cenário com ligação, considerando uma chuva crítica de TR 25 anos na bacia do rio Sarapuí.

Veja que, pelo perfil longitudinal do rio Iguaçu, que a água da cheia do Sarapuí foi corretamente levada para o rio Iguaçu, sem afetá-lo, pois, em nenhum momento esse acréscimo gerou extravasamento.

Aqui, novamente, pode-se analisar o funcionamento do canal de interligação utilizando-se dos mapas de manchas de inundação. A Figura 2.25 apresenta a mancha de inundação para TR 25 anos sem o canal e a Figura 2.26 apresenta a mancha com a inclusão do canal.

A Figura 2.27 apresenta as diferenças nos níveis d'água máximos entre os dois cenários.

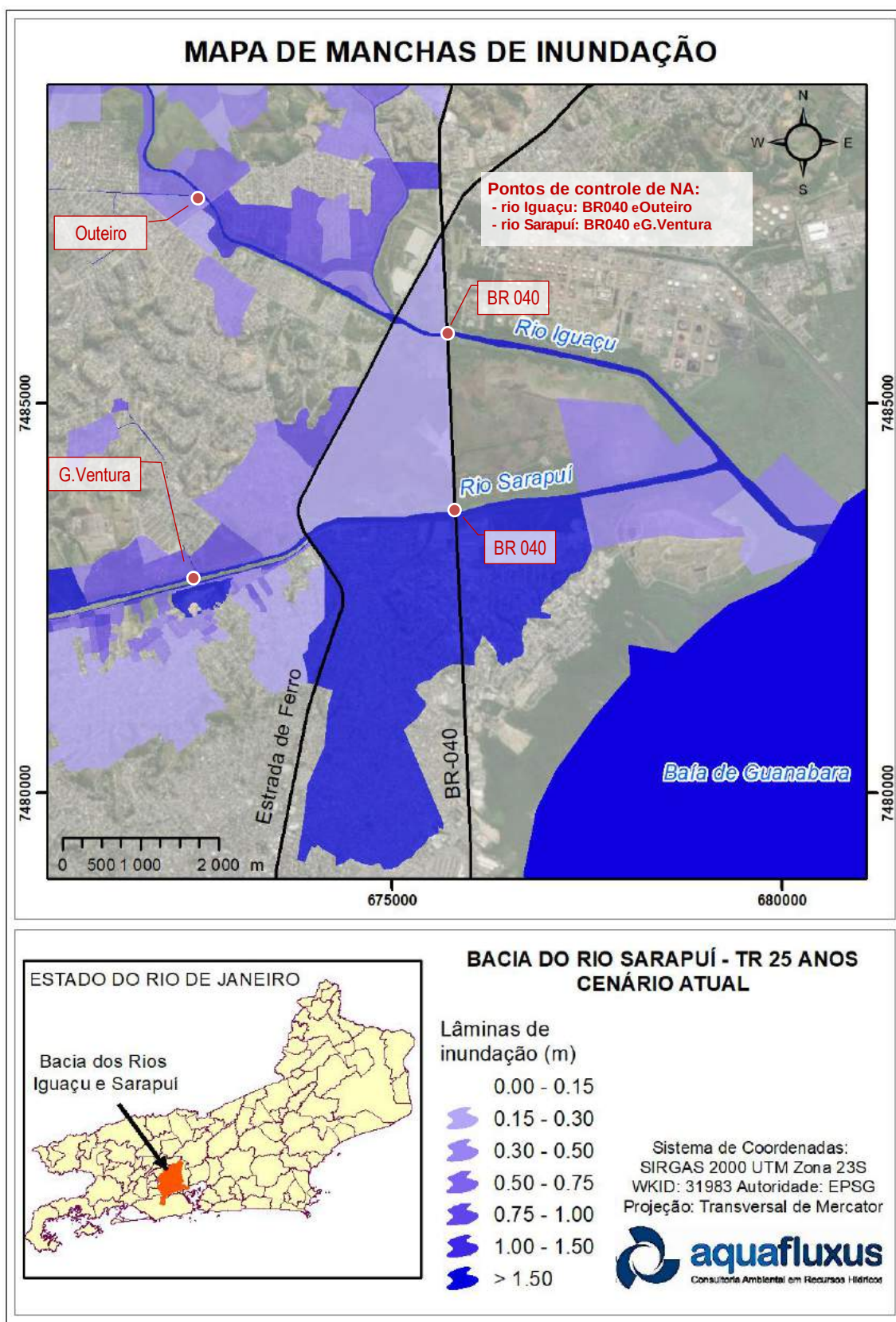


Figura 2.25 – Mancha de inundação do Cenário Atual para a chuva na bacia crítica na bacia do rio Sarapuí com Tempo de Recorrência de 25 anos.

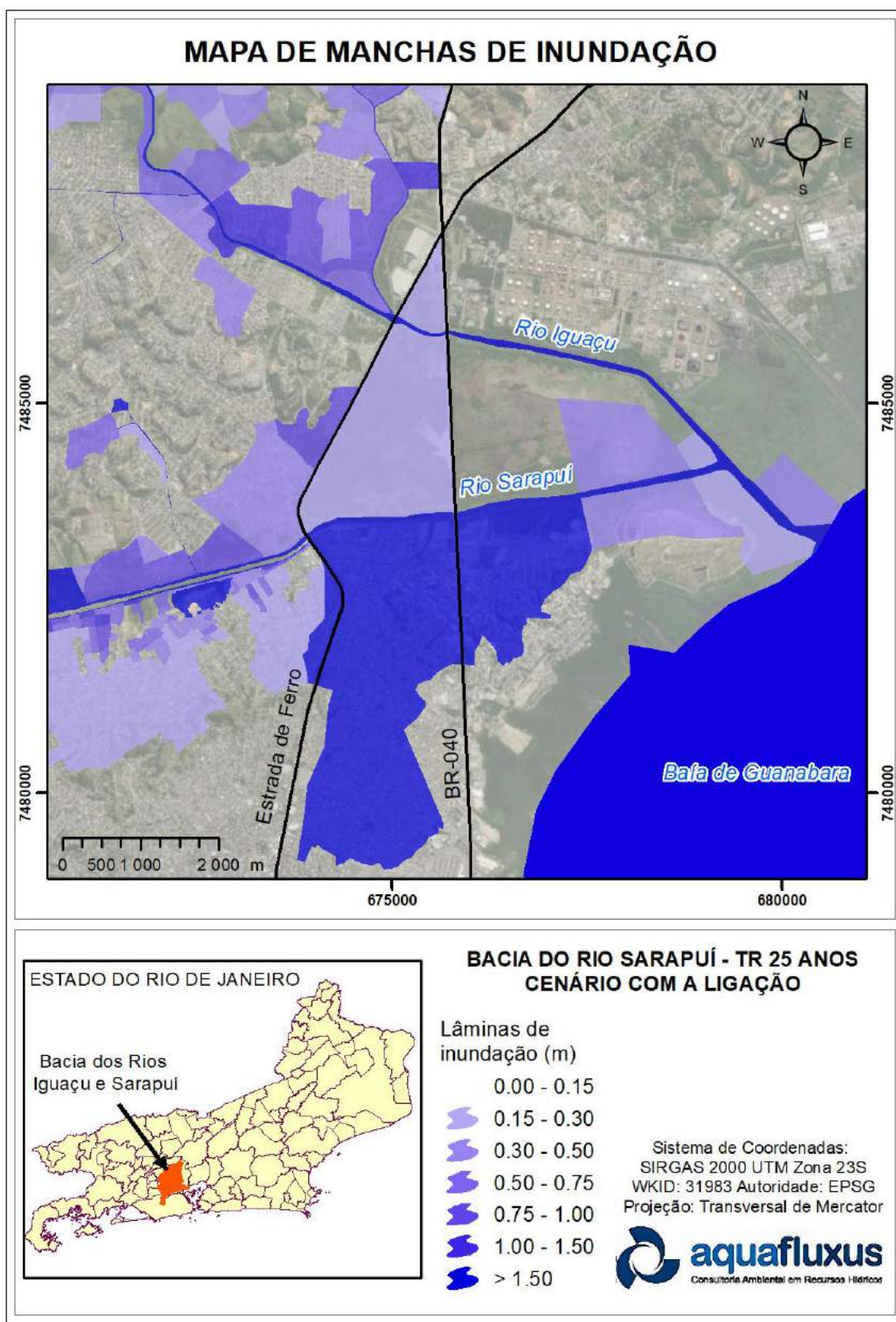


Figura 2.26 – Mancha de inundação do Cenário com ligação para a chuva crítica na bacia do rio Sarapuí com Tempo de Recorrência de 25 anos.

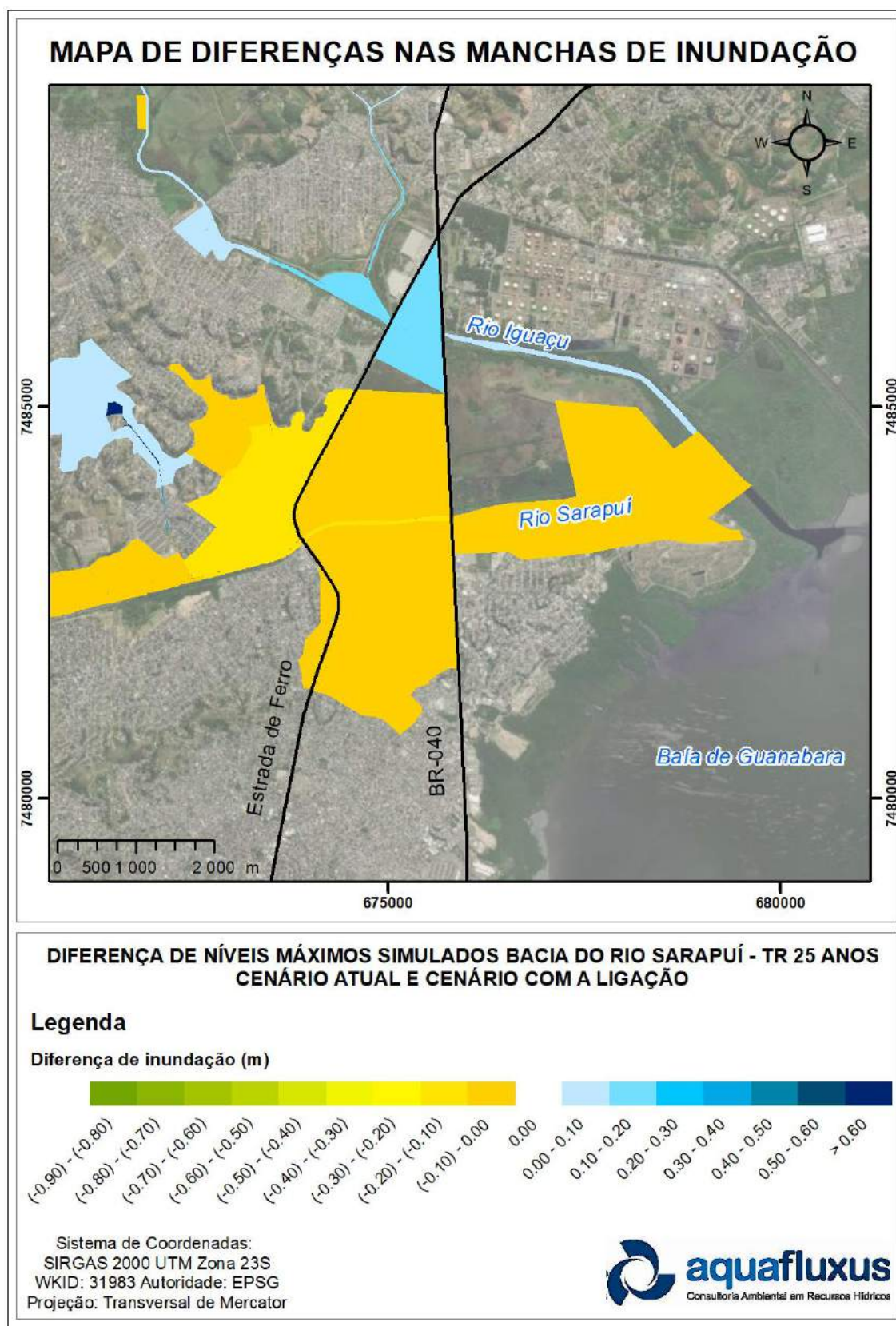


Figura 2.27 – Comparação entre a diferença nos alagamentos para os cenários simulados considerando uma chuva crítica na bacia do rio Sarapuí com Tempo de Recorrência de 25 anos.

Conclusão: Esses resultados mostram que os níveis máximos no rio Sarapuí têm uma redução entre 17cm (junto ao empreendimento) e 9cm (junto ao G.Ventura), gerando uma elevação no rio Iguaçu que varia entre 12cm (junto ao empreendimento) e 9cm (junto ao Outeiro).

Ao se analisar os níveis d'água do rio Sarapuí quando essa bacia está sujeita a temporais, podemos concluir que o canal de interligação possibilita as seguintes reduções de NA nos dois pontos de controle mais críticos observados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Avaliação dos efeitos do canal de ligação.

Funcionamento do canal para uma chuva na bacia do rio Sarapuí				
Temporais na bacia do Sarapuí		TR 10	TR 25	TR 50
Pontos de Controle	Junto a BR 040	Abaixa 14 cm	Abaixa 17 cm	-
	Junto ao Canal Gaspar Ventura	Abaixa 07 cm	Abaixa 09 cm	-

2.2.3.1.3. Bacia do rio Sarapuí com chuva de TR de 50 anos.

Finalmente, repete-se o mesmo procedimento para uma chuva de 50 anos caindo sobre a bacia do Sarapuí. Da Figura 2.28 à Figura 2.31 são exibidos os resultados de níveis de água dos quatro trechos mais críticos, com o Sarapuí sob uma chuva de 50 anos de recorrência e o Iguaçu com uma chuva constante de recorrência anual.

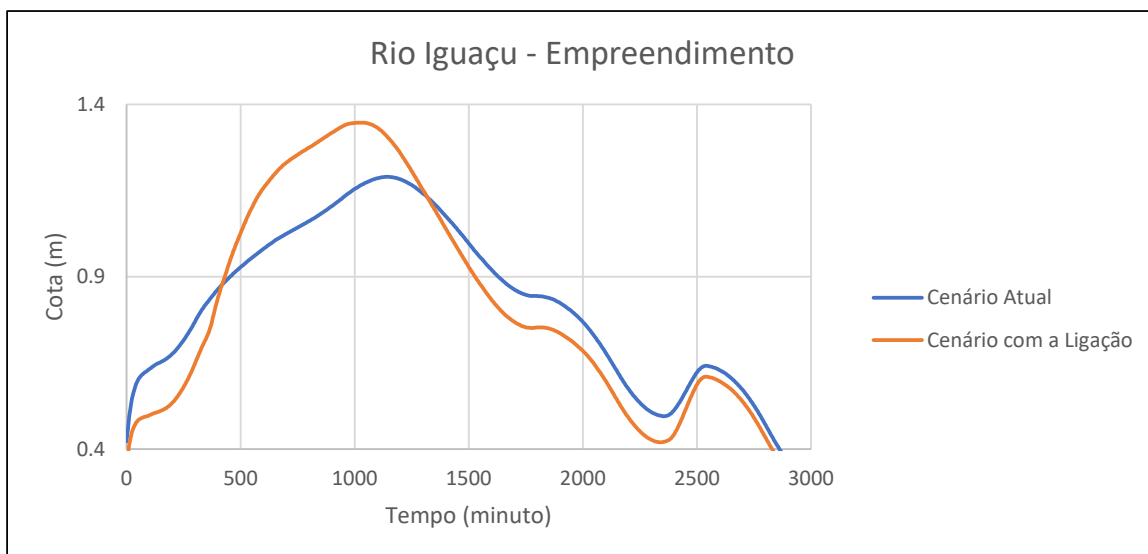


Figura 2.28 - Cotagrama do rio Iguaçu, no trecho do empreendimento

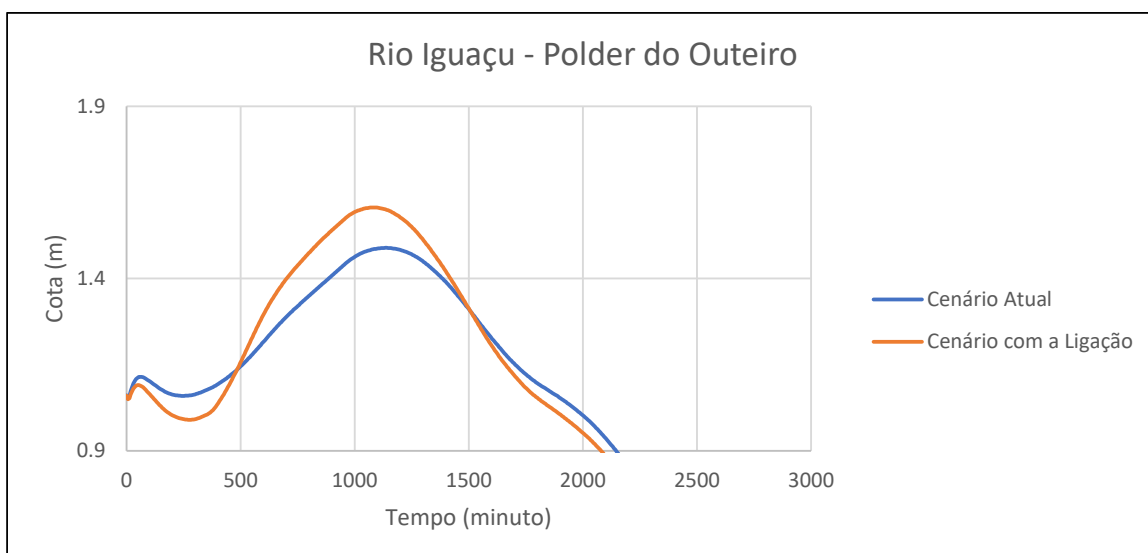


Figura 2.29 - Cotagrama do rio Iguaçu, no trecho do Pôlder do Outeiro

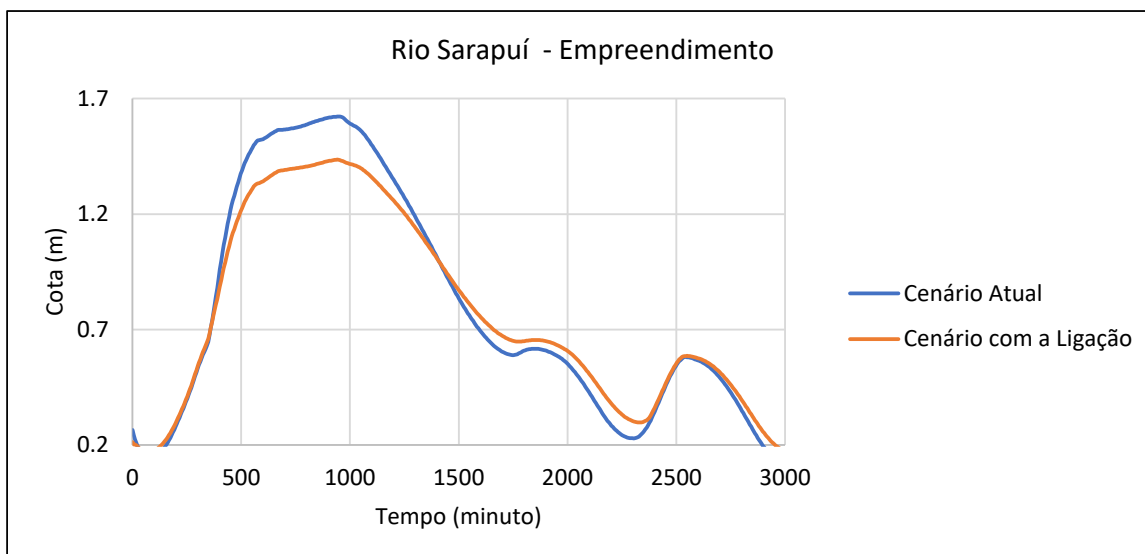


Figura 2.30 - Cotagrama do rio Sarapuí, no trecho do empreendimento

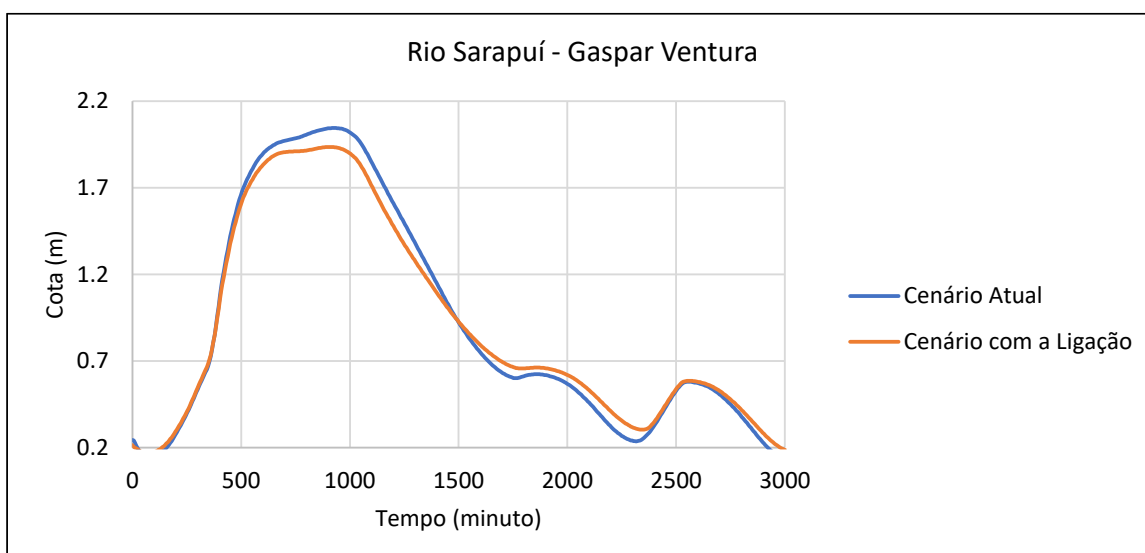


Figura 2.31 - Cotagrama do rio Sarapuí, no trecho do Gaspar Ventura

O gráfico da Figura 2.32 apresenta a comparação dos níveis máximos de ambos os rios junto ao empreendimento.

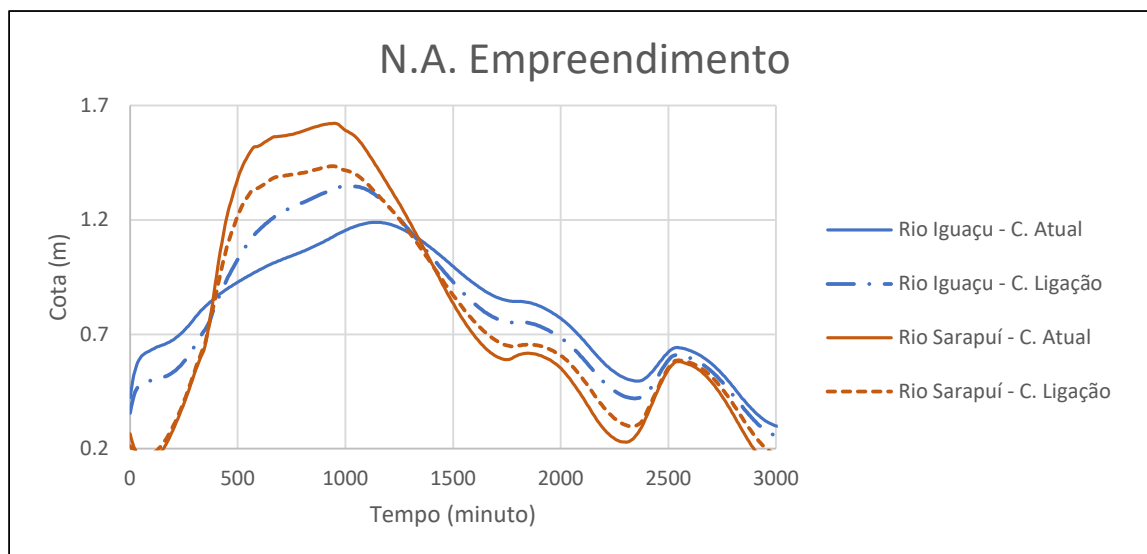


Figura 2.32 – Comparação dos cotogramas dos rios Iguaçu e Sarapuí, no trecho do empreendimento.

Como pode ser verificado nos cotogramas acima, o canal de interligação também funciona adequadamente para a chuva de 50 anos, aliviando a calha do rio Sarapuí e transferindo água para o rio Iguaçu, o que pode ser também verificado pelos perfis longitudinais dos rios. Nesse cenário, é interessante notar que o pico no Sarapuí agora acaba coincidindo com o pico do Iguaçu, por efeito de remanso, mostrando como essa interação é forte. E deve-se destacar que isso ocorre já hoje, mesmo sem o canal de ligação, uma vez que o rio Sarapuí afluí ao rio Iguaçu pouco adiante e antes do deságue deste último na Baía de Guanabara. Ou seja, a interação existe mesmo hoje; porém, o canal de ligação potencializa o uso compartilhado da foz, a favor de uma drenagem mais eficiente.

A Figura 2.33 e a Figura 2.34 apresentam a diferença no perfil longitudinal dos rios Iguaçu e Sarapuí para os cenários simulados.

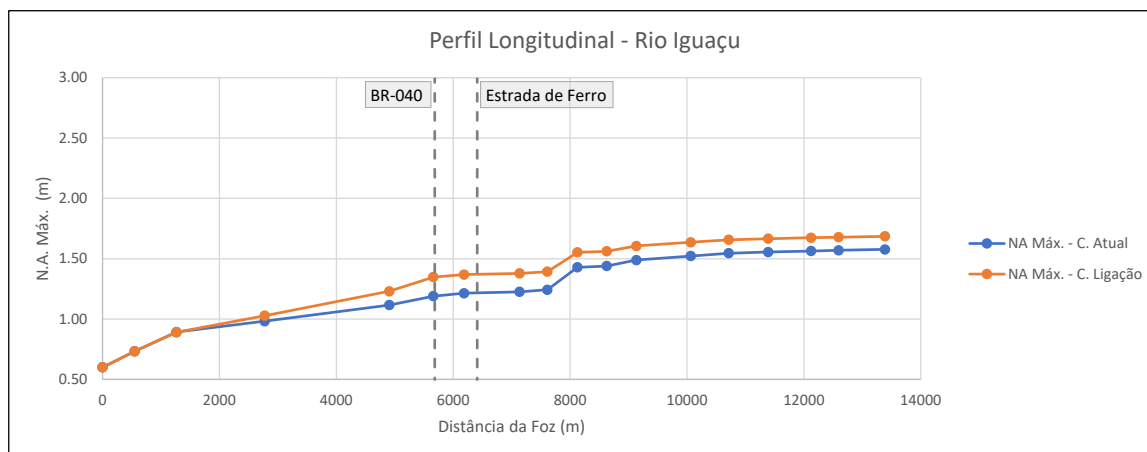


Figura 2.33 – Perfil Longitudinal do rio Iguaçu para o cenário atual e para o cenário com ligação, considerando uma chuva crítica de TR 50 anos na bacia do rio Sarapuí.

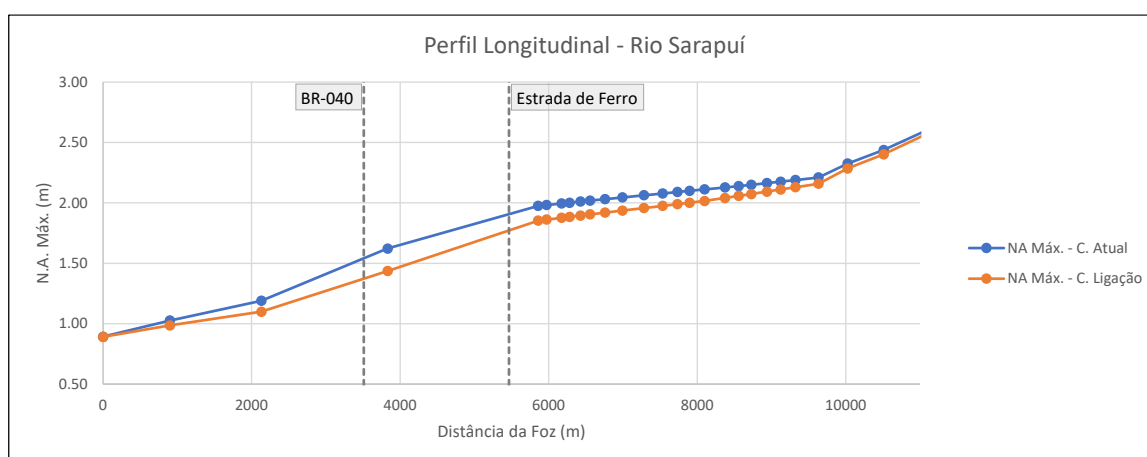


Figura 2.34 – Perfil Longitudinal do rio Sarapuí para o cenário atual e para o cenário com ligação, considerando uma chuva crítica de TR 50 anos na bacia do rio Sarapuí.

Desejando-se analisar o funcionamento do canal de interligação através dos mapas de manchas de inundação, apresenta-se a Figura 2.35 com a mancha de inundação para TR 50 anos sem o canal e a Figura 2.36 com a mancha com a inclusão do canal.

A Figura 2.37 apresenta as diferenças nos níveis d'água máximos entre os dois cenários.

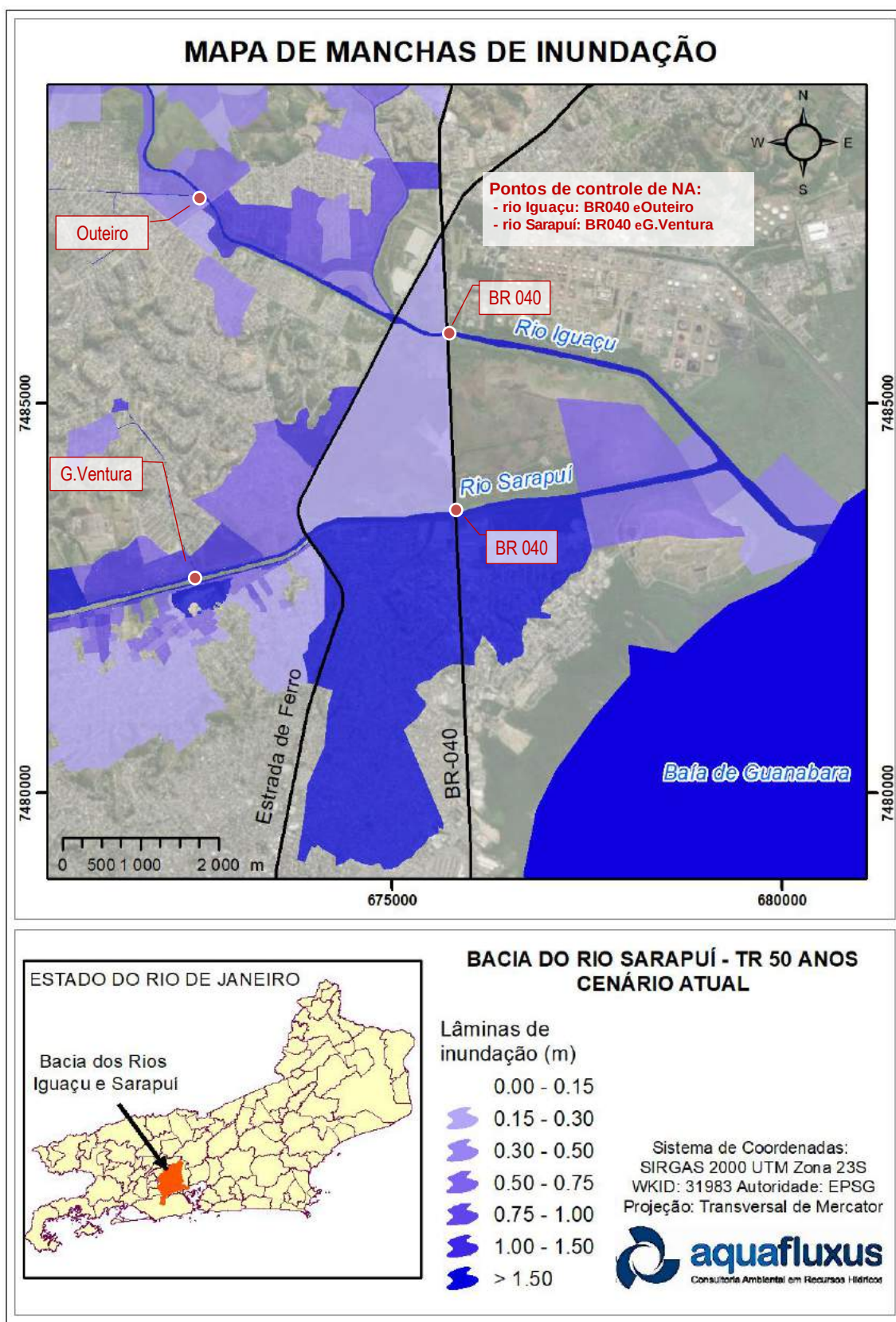


Figura 2.35 – Mancha de inundação do Cenário Atual para a chuva crítica na bacia do rio Sarapuí com Tempo de Recorrência de 50 anos.

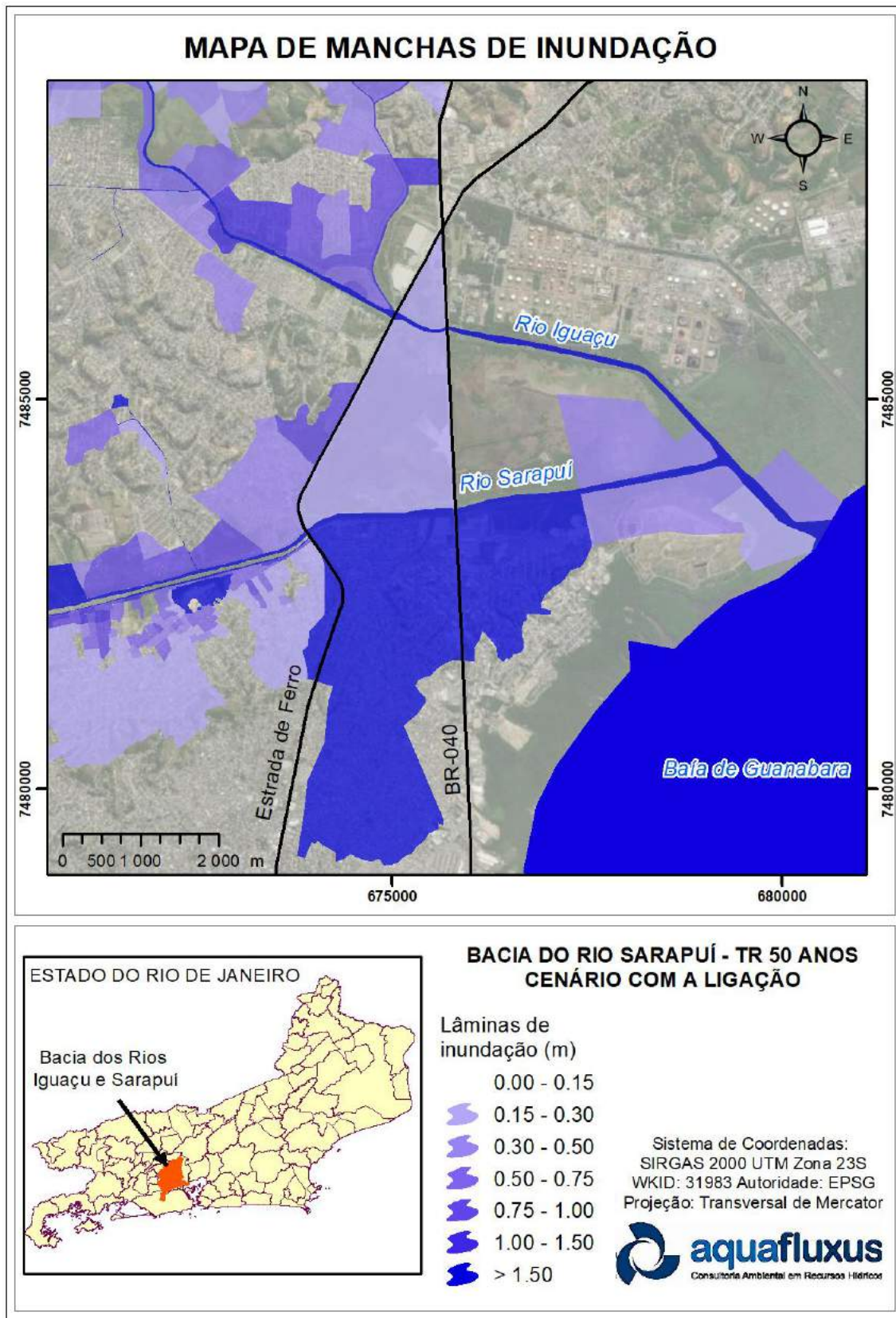


Figura 2.36 – Mancha de inundação do Cenário com ligação para a chuva crítica na bacia do rio Sarapuí com Tempo de Recorrência de 50 anos.

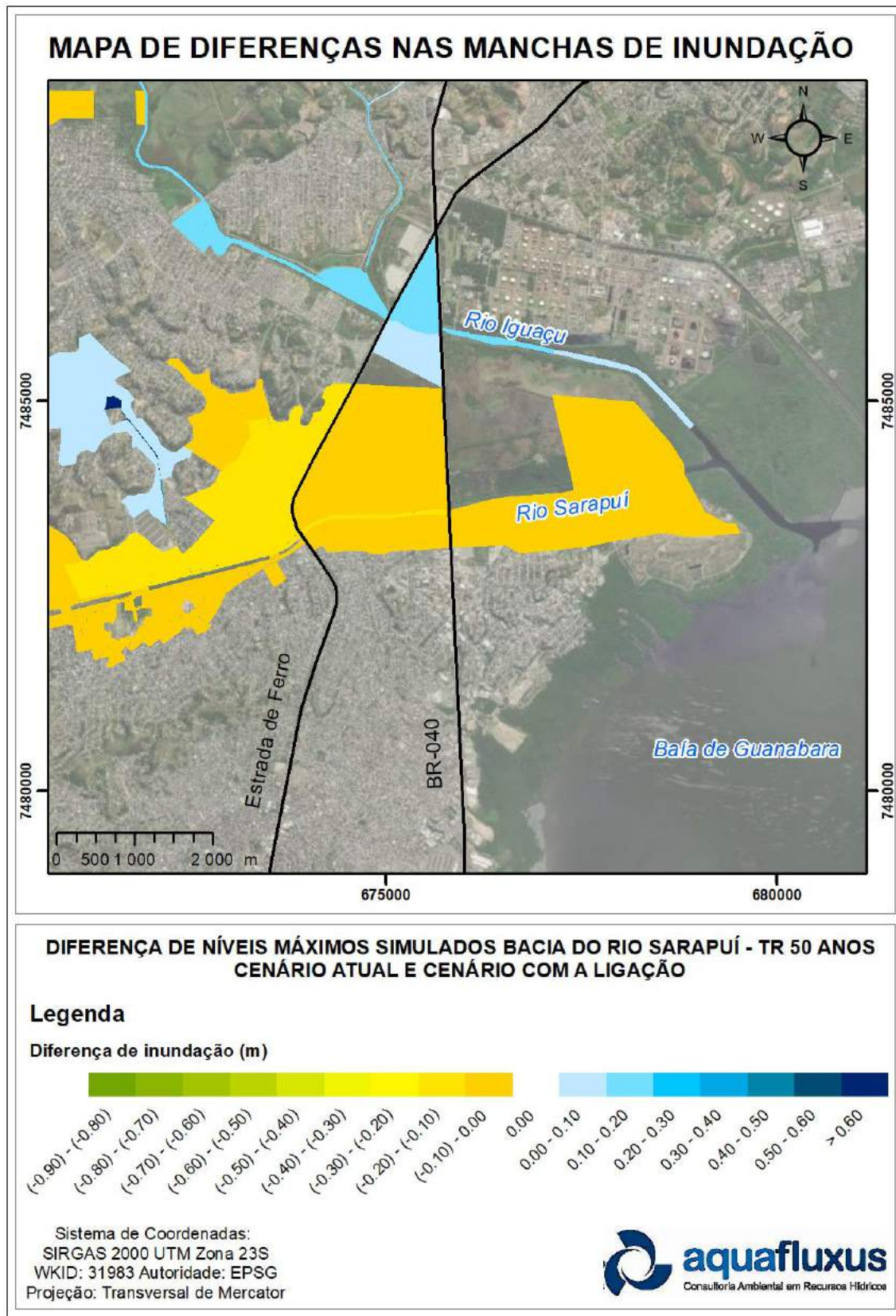


Figura 2.37 – Comparação entre a diferença nos alagamentos para os cenários simulados considerando uma chuva crítica na bacia do rio Sarapuí com Tempo de Recorrência de 50 anos.

Conclusão: Os resultados observados mostram que os níveis máximos no rio Sarapuí têm uma redução entre 19cm (junto ao empreendimento) e 11cm (junto ao G.Ventura), gerando uma elevação no rio Iguaçu que varia entre 16cm (junto ao empreendimento) e 12cm (junto ao Outeiro).

Ao se analisar os níveis d'água do rio Sarapuí quando essa bacia está sujeita a temporais, podemos concluir que o canal de interligação possibilita as seguintes reduções de NA nos dois pontos de controle mais críticos observados na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Avaliação dos efeitos do canal de ligação.

Funcionamento do canal para uma chuva na bacia do rio Sarapuí				
Temporais na bacia do Sarapuí		TR 10	TR 25	TR 50
Pontos de Controle	Junto a BR 040	Abaixa 14 cm	Abaixa 17 cm	Abaixa 19 cm
	Junto ao Canal Gaspar Ventura	Abaixa 07 cm	Abaixa 09 cm	Abaixa 11 cm

2.2.3.2. Resultados para chuvas Críticas na bacia do rio Iguaçu

Esse item apresenta as curvas de nível d'água nos rios Iguaçu e Sarapuí quando a bacia do Iguaçu estiver sujeita a tempestades de TR 10, 25 e 50 e a bacia do Sarapuí estiver com chuvas de recorrência anual.

2.2.3.2.1. Bacia do rio Iguaçu com chuva de TR de 10 anos.

Da Figura 2.38 à Figura 2.41 são apresentados os resultados de níveis de água em quatro trechos importantes durante a simulação do evento que apresenta, na bacia do rio Sarapuí, uma chuva constante no tempo e intensidade inferior à TR de 1 ano, e na bacia do rio Iguaçu uma chuva distribuída no tempo e TR de 10 anos.

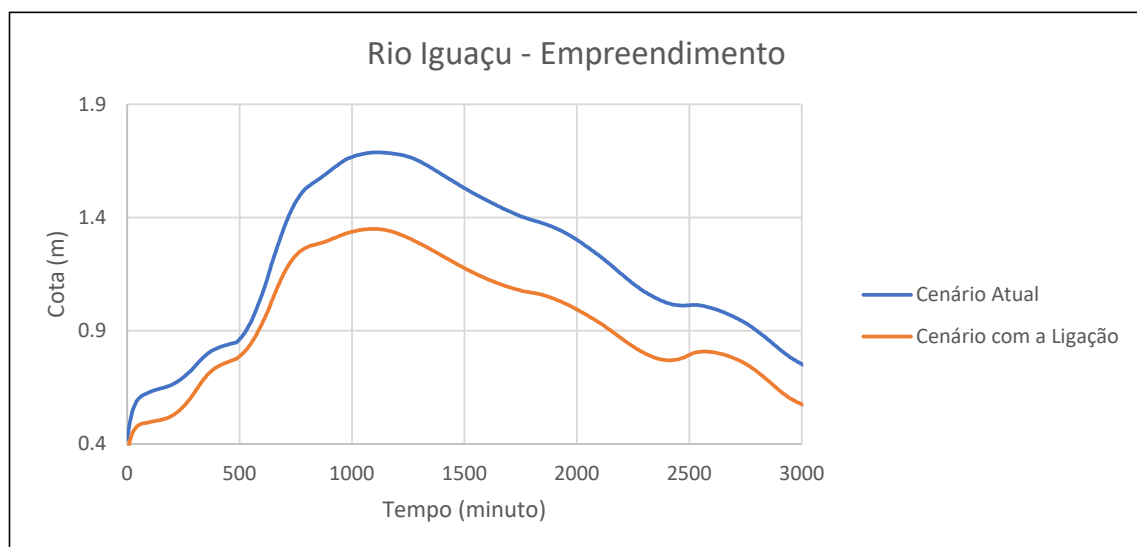


Figura 2.38 - Cotagrama do rio Iguaçu, no trecho do empreendimento

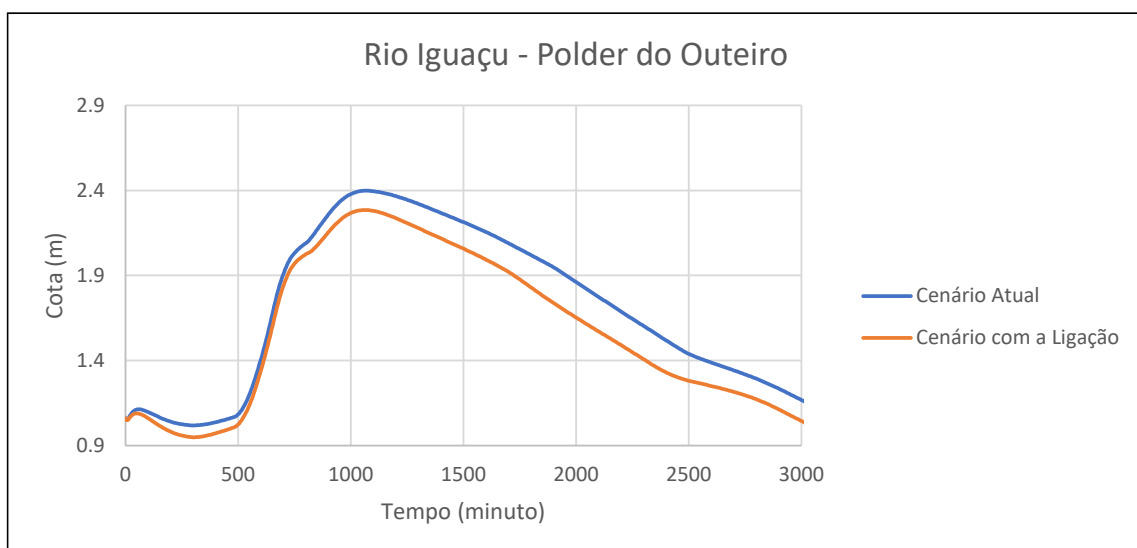


Figura 2.39 - Cotagrama do rio Iguaçu, no trecho do Pôlder do Outeiro

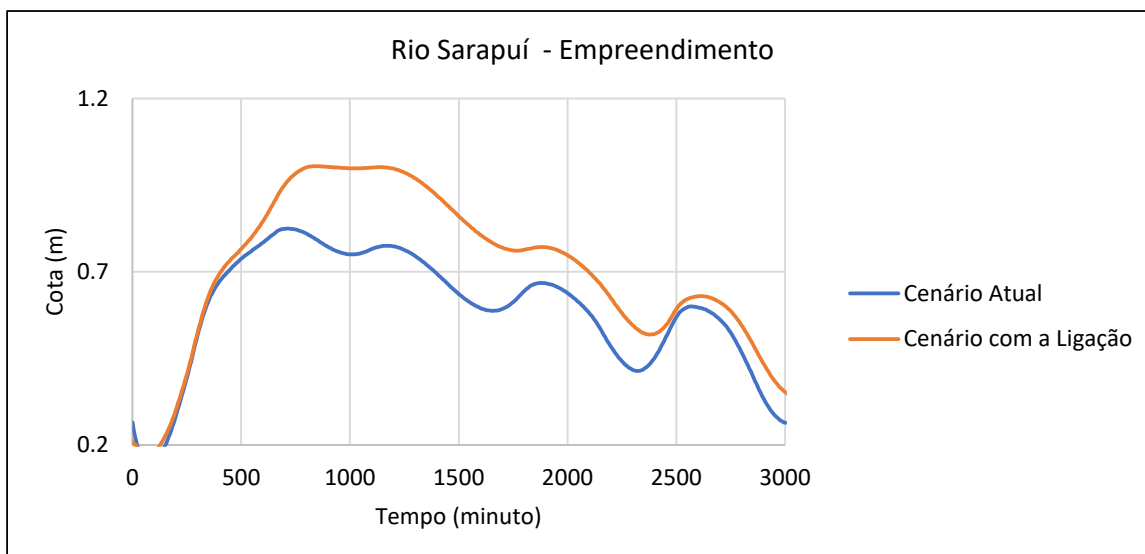


Figura 2.40 - Cotagrama do rio Sarapuí, no trecho do empreendimento

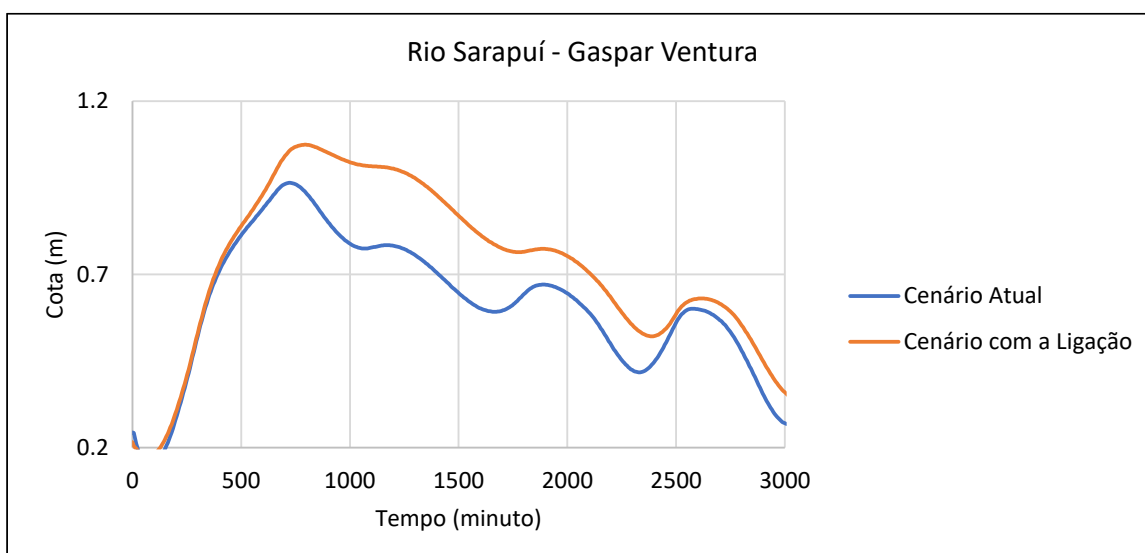


Figura 2.41 - Cotagrama do rio Sarapuí, no trecho do Gaspar Ventura

O gráfico da Figura 2.42 apresenta a comparação dos níveis máximos de ambos os rios junto ao empreendimento.

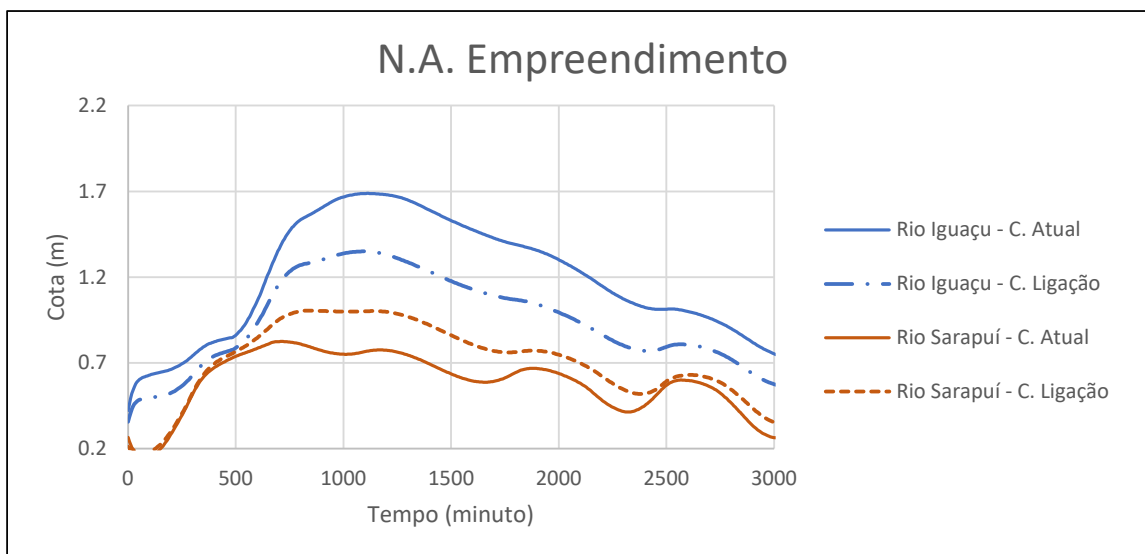


Figura 2.42 – Comparação dos cotogramas dos rios Iguaçu e Sarapuí, no trecho do empreendimento.

Essas figuras destacam a redução importante de níveis no Rio Iguaçu, com uma elevação não relevante no Rio Sarapuí, que mesmo tendo que receber parte da cheia do Iguaçu, tem níveis d'água abaixo daqueles que representam a sua condição para TR de 10 anos, analisada no item anterior.

A Figura 2.43 e a Figura 2.44 apresentam a diferença no perfil longitudinal dos rios Iguaçu e Sarapuí para os cenários simulados.

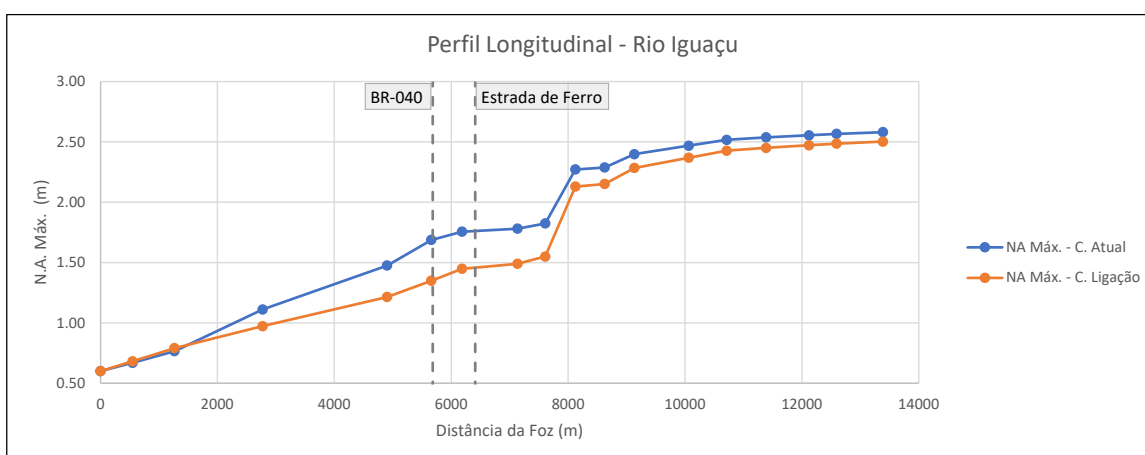


Figura 2.43 – Perfil Longitudinal do rio Iguaçu para o cenário atual e para o cenário com ligação, considerando uma chuva crítica de TR 10 anos na bacia do rio Iguaçu.

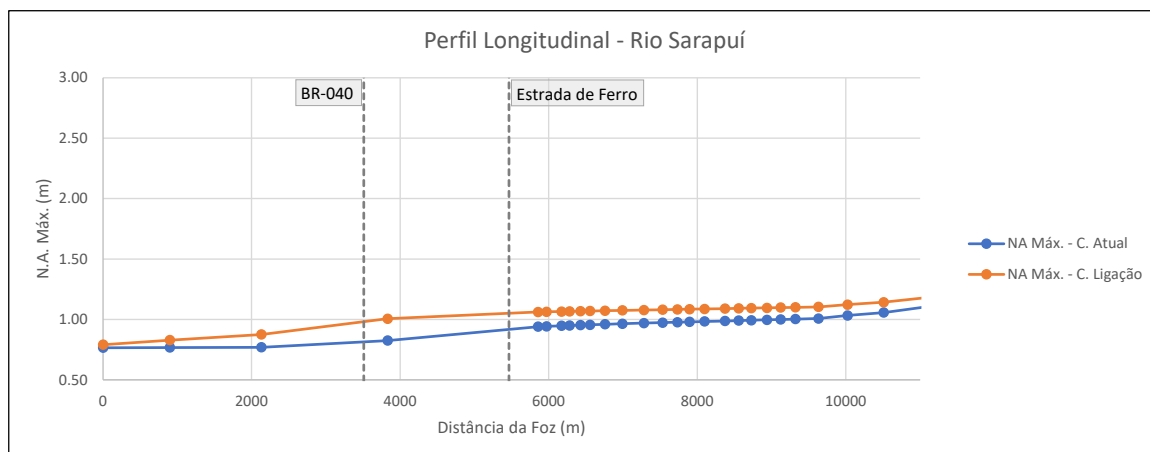


Figura 2.44 – Perfil Longitudinal do rio Sarapuí para o cenário atual e para o cenário com ligação, considerando uma chuva crítica de TR 10 anos na bacia do rio Iguaçu.

A Figura 2.45 apresenta a mancha de inundação no trecho final dos rios Iguaçu e Sarapuí para o cenário atual e a Figura 2.46 apresenta a mancha de inundação para o cenário com a ligação. A Figura 2.47 apresenta as diferenças nos níveis d'água máximos entre os dois cenários.

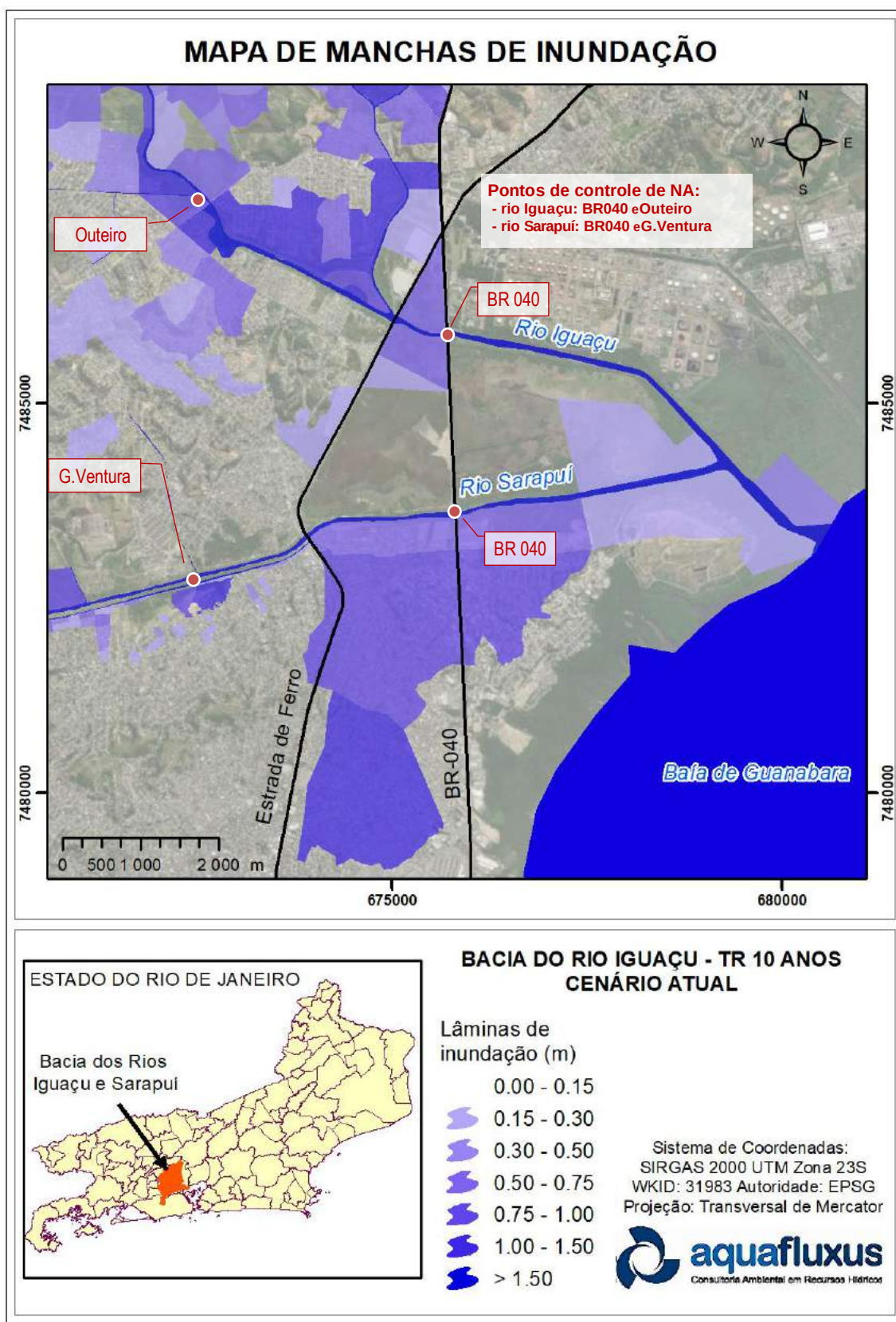


Figura 2.45 – Mancha de inundação do Cenário Atual para a chuva crítica na bacia do rio Iguaçu com Tempo de Recorrência de 10 anos.

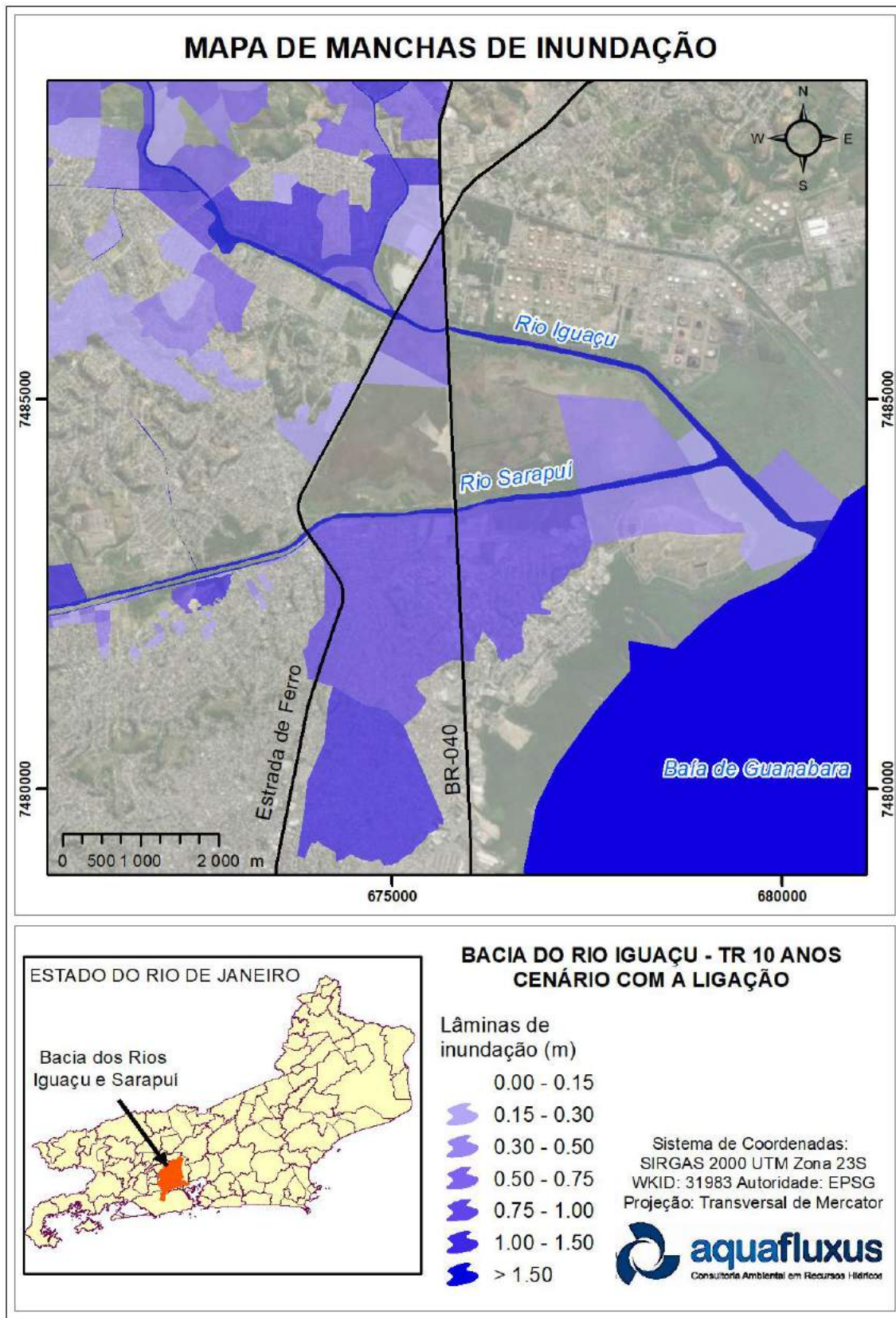


Figura 2.46 – Mancha de inundação do Cenário com ligação para a chuva crítica na bacia do rio Iguaçu com Tempo de Recorrência de 10 anos.

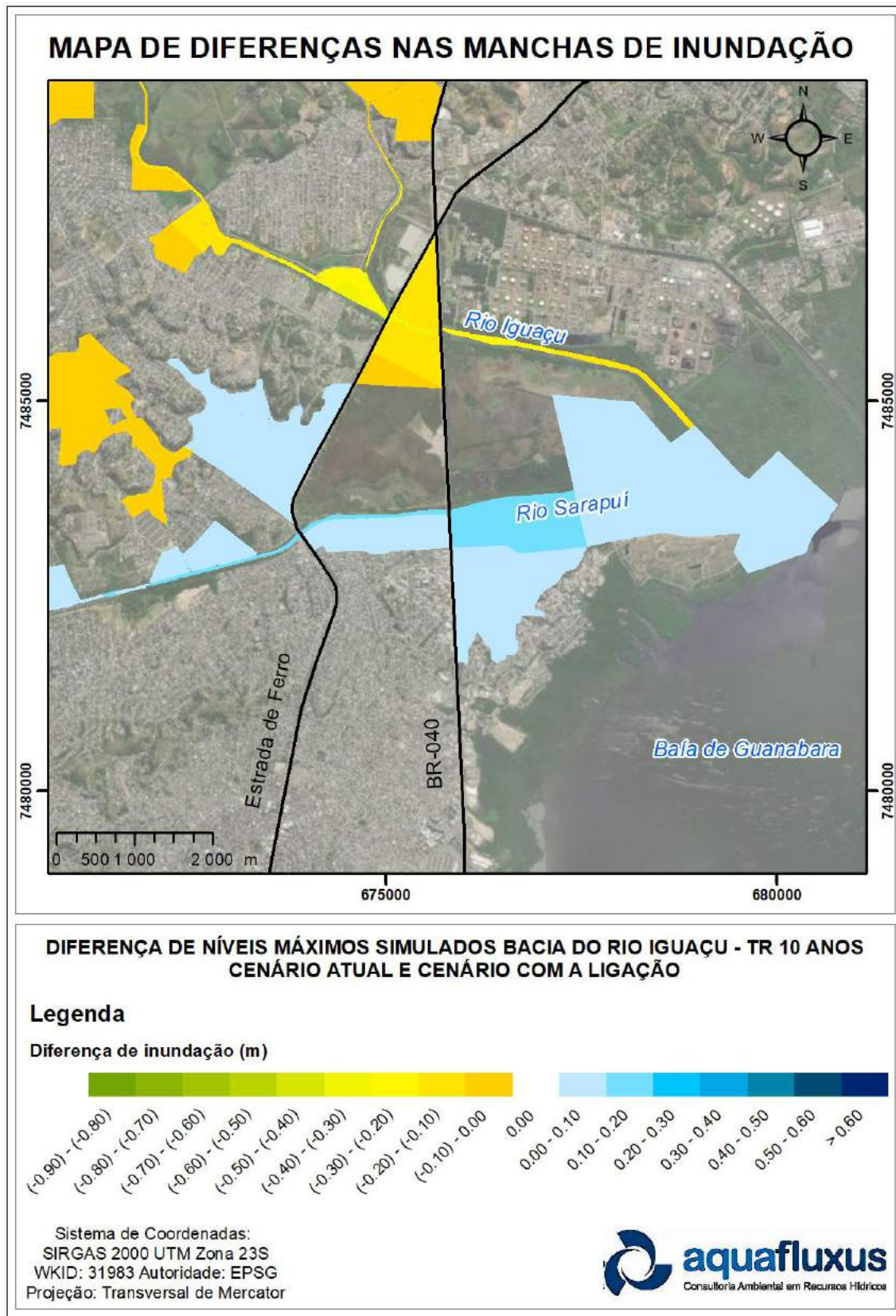


Figura 2.47 – Comparação entre a diferença nos alagamentos para os cenários simulados considerando uma chuva crítica na bacia do rio Iguaçu com Tempo de Recorrência de 10 anos.

Conclusão: É possível observar que os níveis máximos no rio Iguaçu reduziram em 34 cm (junto ao empreendimento) e 14 cm (junto ao Outeiro), gerando, em contrapartida, uma elevação no rio Sarapuí de 18cm (junto ao empreendimento) e 11cm (junto ao Gaspar Ventura). Ainda assim, essa sobrelevação no Rio Sarapuí não chega a um patamar relevante de nível d'água, mostrando o acerto da proposta.

Ao se analisar os níveis d'água do rio Iguaçu quando essa bacia está sujeita a temporais, podemos concluir que o canal de interligação possibilita as seguintes reduções de NA nos dois pontos de controle mais críticos observados na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Avaliação dos efeitos do canal de ligação.

Funcionamento do canal para uma chuva na bacia do rio Iguaçu				
Temporais na bacia do Iguaçu		TR 10	TR 25	TR 50
Pontos de Controle	Junto a BR 040	Abaixa 34 cm	-	-
	Junto ao Pôlder do Outeiro	Abaixa 14 cm	-	-

2.2.3.2.2. Bacia do rio Iguaçu com chuva de TR de 25 anos.

Da Figura 2.48 à Figura 2.51 podem ser apreciados os resultados de níveis de água em quatro trechos importantes durante a simulação do evento que considera, na bacia do rio Sarapuí, uma chuva constante no tempo e intensidade inferior à TR de 1 ano, e considera, na bacia do rio Iguaçu, uma chuva distribuída no tempo e com TR de 25 anos.

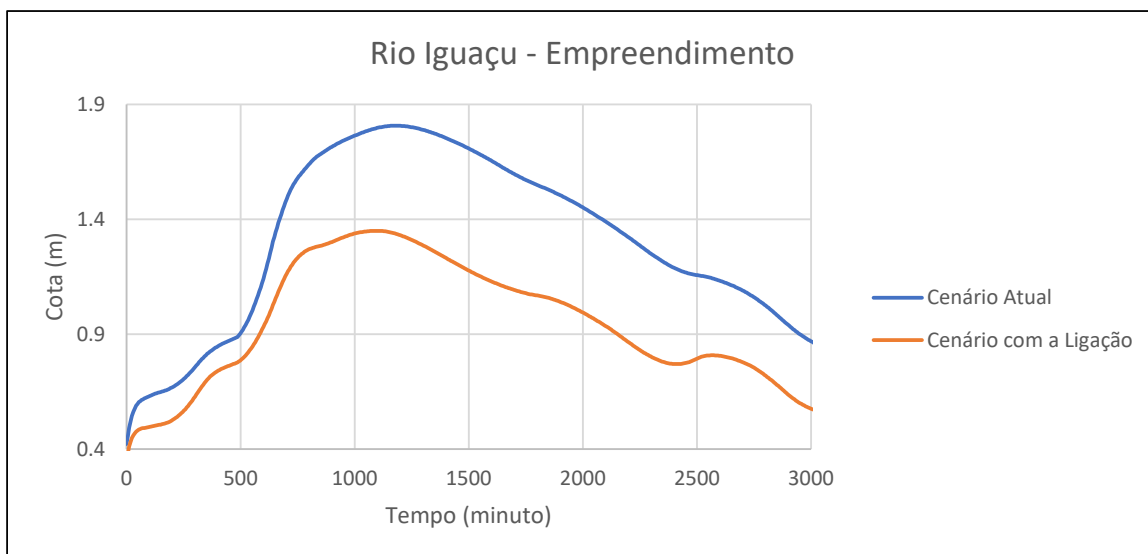


Figura 2.48 - Cotagrama do rio Iguaçu, no trecho do empreendimento

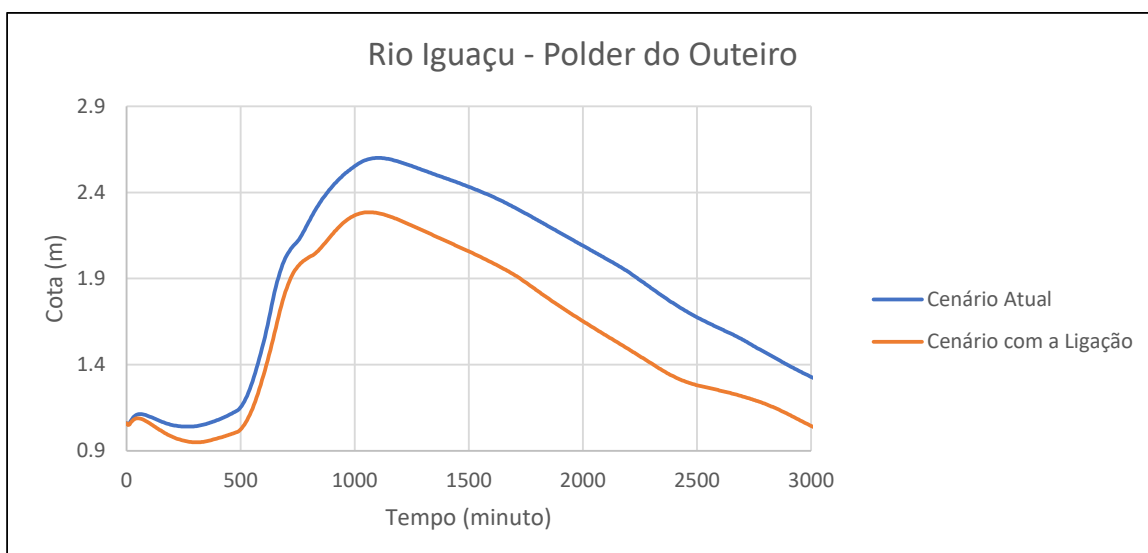


Figura 2.49 - Cotagrama do rio Iguaçu, no Pôlder do Outeiro

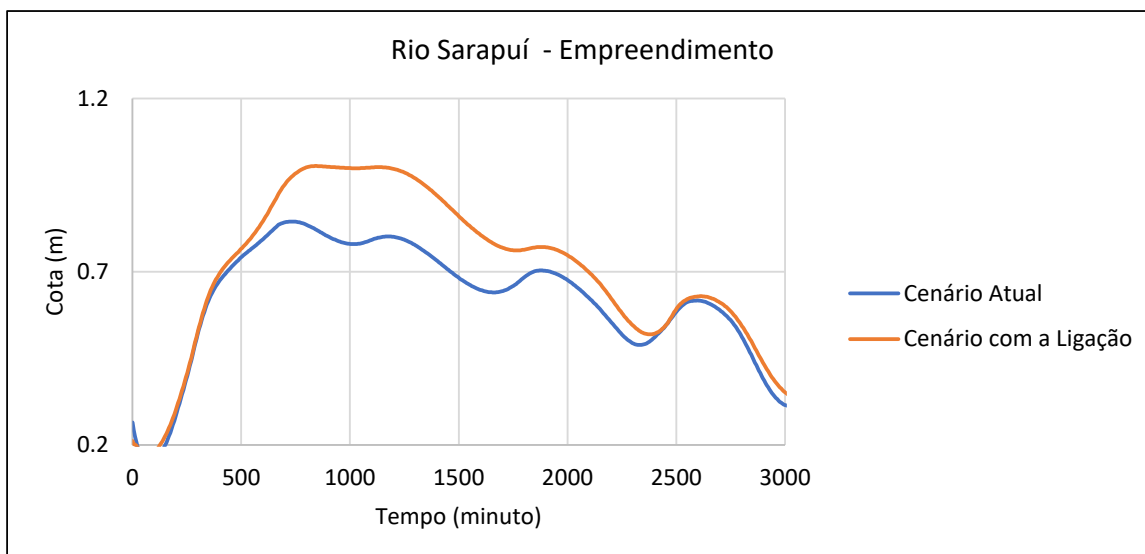


Figura 2.50 - Cotograma do rio Sarapuí, no trecho do empreendimento

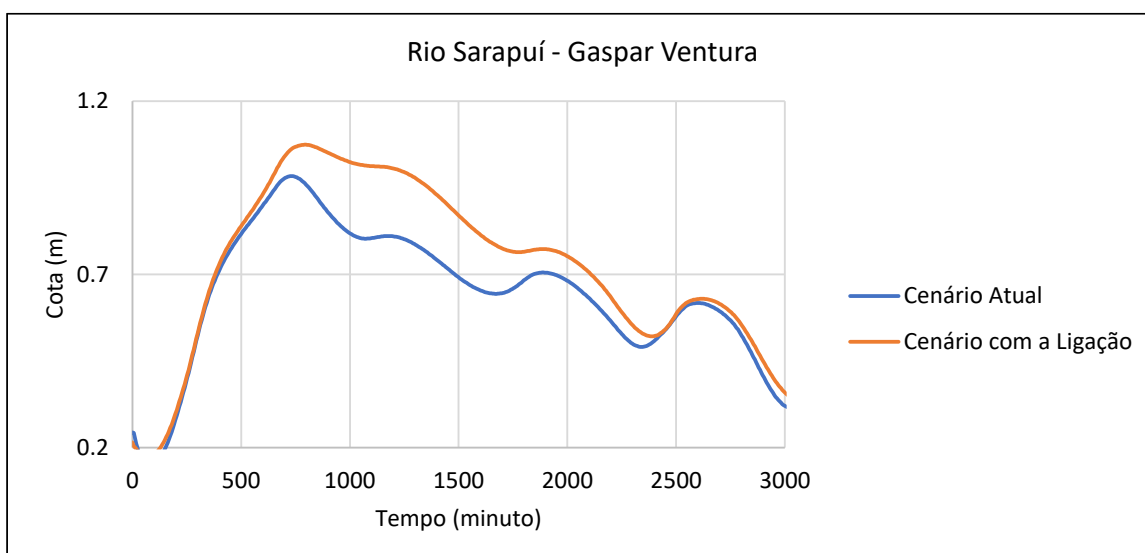


Figura 2.51 - Cotograma do rio Sarapuí, no trecho do Gaspar Ventura

O gráfico da Figura 2.52 apresenta a comparação dos níveis máximos de ambos os rios junto ao empreendimento.

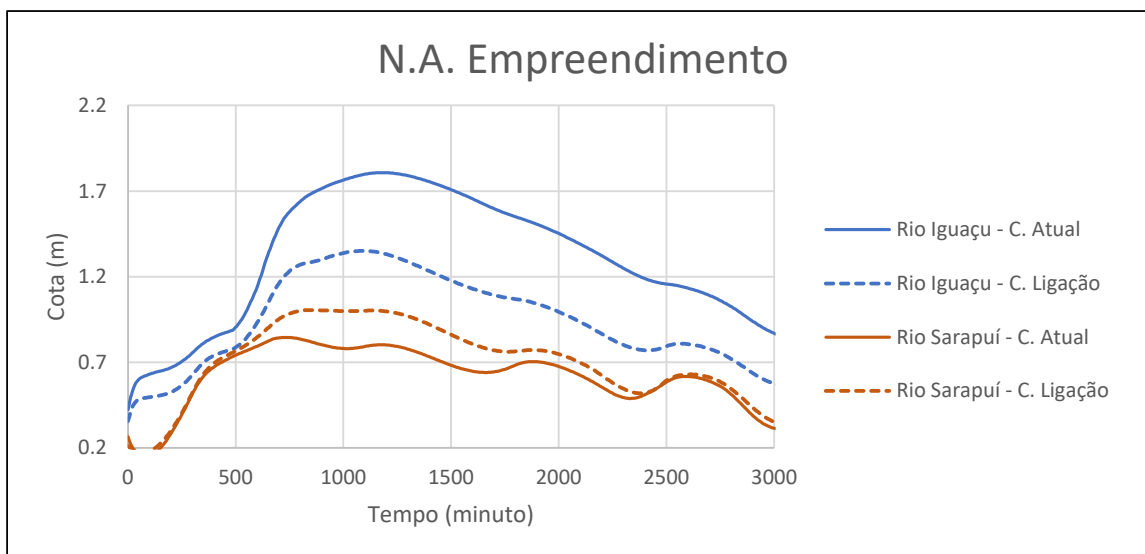


Figura 2.52 – Comparação dos cotogramas dos rios Iguaçu e Sarapuí, no trecho do empreendimento.

A Figura 2.53 e a Figura 2.54 apresentam a diferença no perfil longitudinal dos rios Iguaçu e Sarapuí para os cenários simulados.

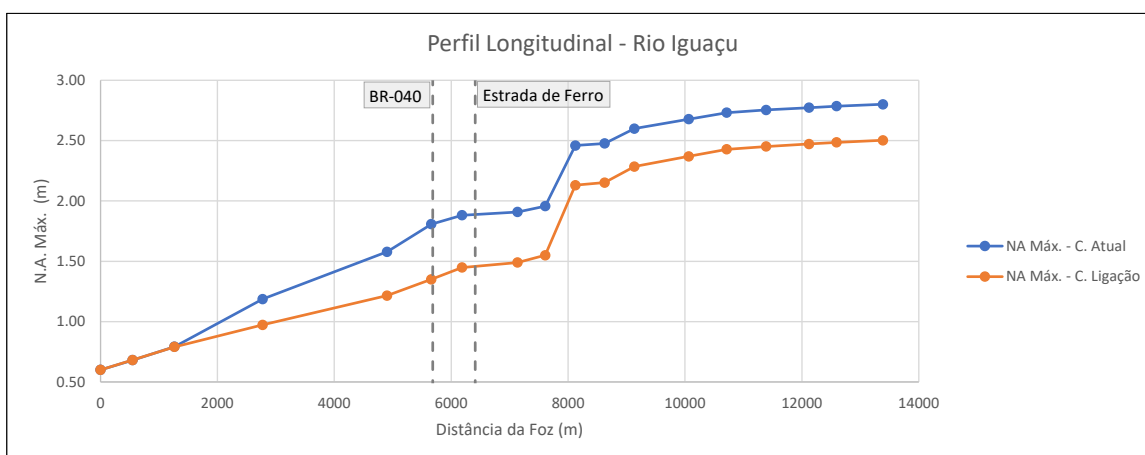


Figura 2.53 – Perfil Longitudinal do rio Iguaçu para o cenário atual e para o cenário com ligação, considerando uma chuva crítica de TR 25 anos na bacia do rio Iguaçu.

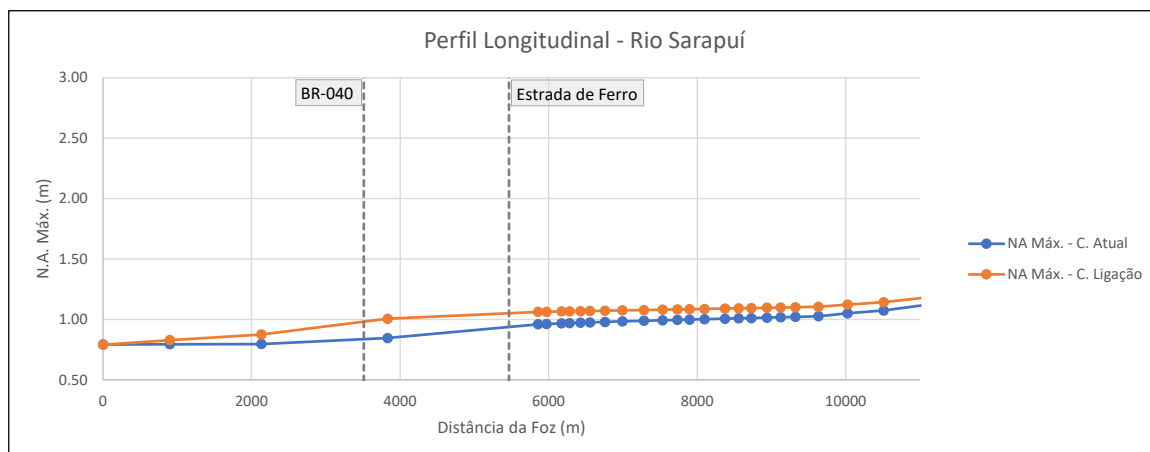


Figura 2.54 – Perfil Longitudinal do rio Sarapuí para o cenário atual e para o cenário com ligação, considerando uma chuva crítica de TR 25 anos na bacia do rio Iguaçu.

A Figura 2.55 apresenta a mancha de inundação no trecho final dos rios Iguaçu e Sarapuí para o cenário atual e a Figura 2.56 apresenta a mancha para o cenário com a ligação. A Figura 2.57 apresenta as diferenças nos níveis d'água máximos entre os dois cenários.

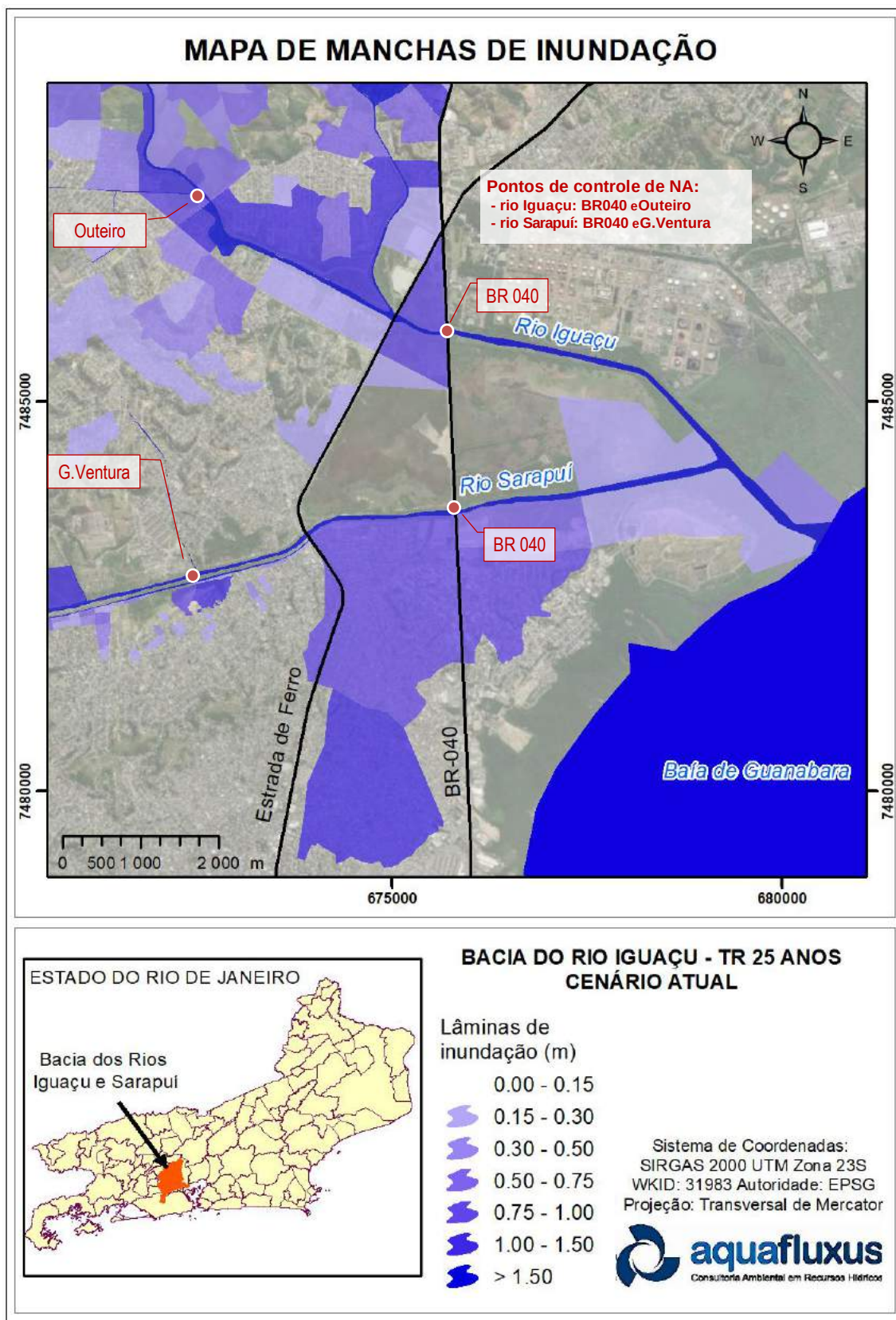


Figura 2.55 – Mancha de inundação do Cenário Atual para a chuva crítica na bacia do rio Iguaçu com Tempo de Recorrência de 25 anos.

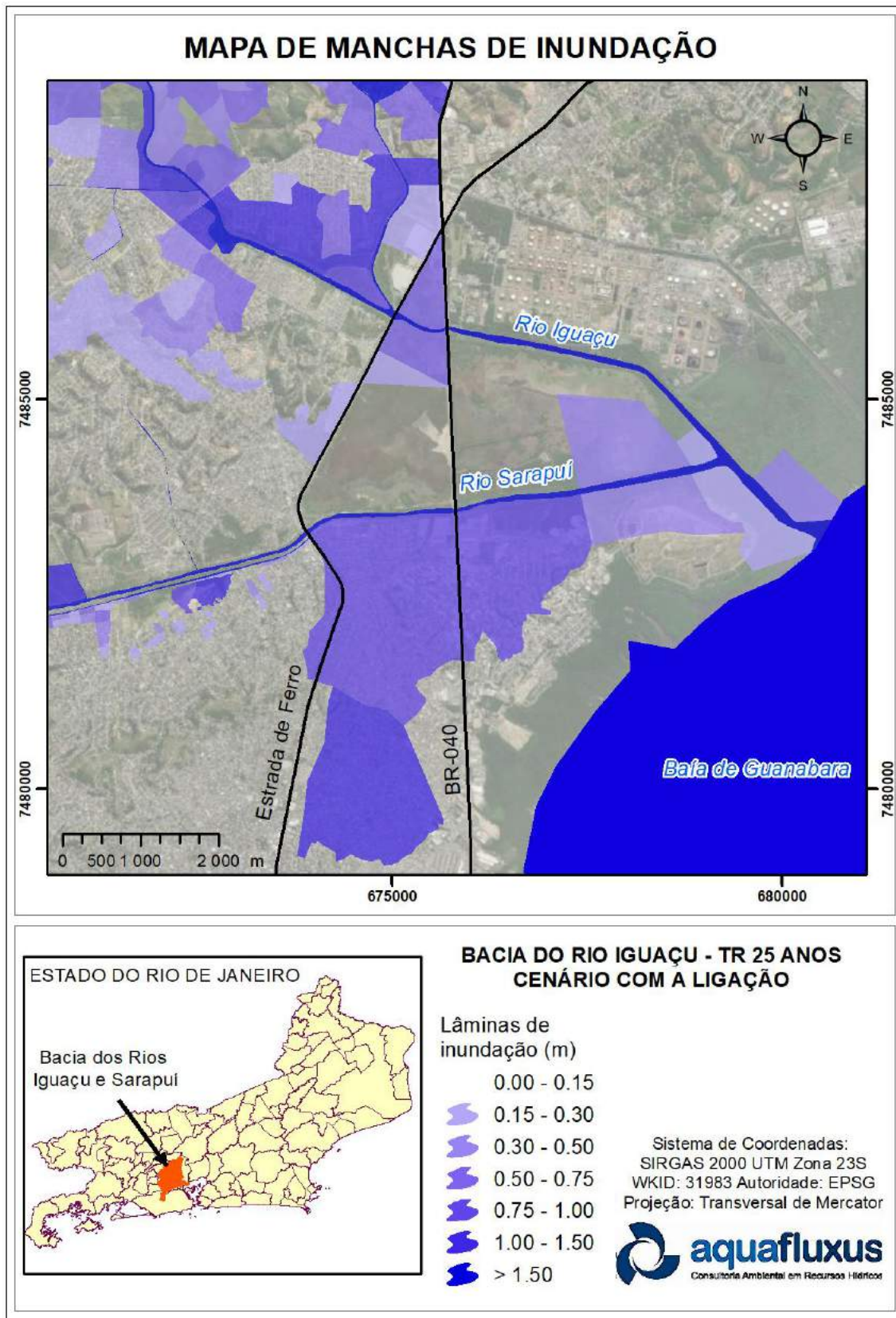


Figura 2.56 – Mancha de inundação do Cenário com ligação para a chuva crítica na bacia do rio Iguaçu com Tempo de Recorrência de 25 anos.

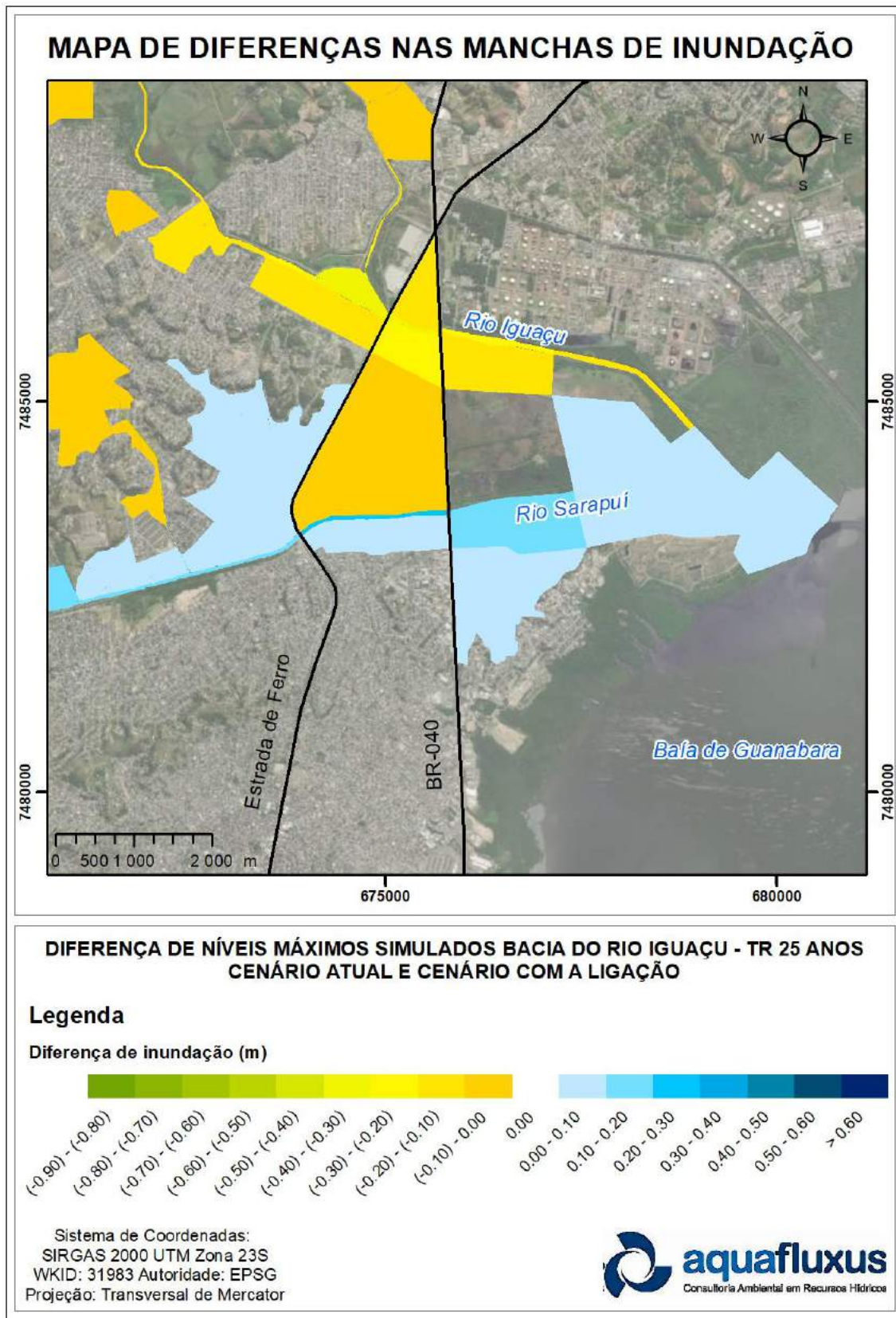


Figura 2.57 – Comparação entre a diferença nos alagamentos para os cenários simulados considerando uma chuva crítica na bacia do rio Iguaçu com Tempo de Recorrência de 25 anos.

Conclusão: É possível observar que os níveis máximos no rio Iguaçu reduziram em 36cm (junto ao empreendimento) e 11cm (junto ao Outeiro), gerando uma elevação no rio Sarapuí de 23cm (junto ao empreendimento) e 13cm (junto ao Gaspar Ventura).

Ao se analisar os níveis d'água do rio Iguaçu quando essa bacia está sujeita a temporais, podemos concluir que o canal de interligação possibilita as reduções de NA nos dois pontos de controle mais críticos observados na Tabela 2.7.

Tabela 2.7 – Avaliação dos efeitos do canal de ligação.

Funcionamento do canal para uma chuva na bacia do rio Iguaçu				
Temporais na bacia do Iguaçu		TR 10	TR 25	TR 50
Pontos de Controle	Junto a BR 040	Abaixa 34 cm	Abaixa 36 cm	-
	Junto ao Pôlder do Outeiro	Abaixa 14 cm	Abaixa 11 cm	-

2.2.3.2.3. Bacia do rio Iguaçu com chuva de TR de 50 anos.

Da Figura 2.58 à Figura 2.61 são apresentados os resultados de níveis de água em quatro trechos importantes durante a simulação do evento que possui chuva constante no tempo e intensidade inferior à TR de 1 ano na bacia do rio Sarapuí e chuva distribuída no tempo e TR de 50 anos na bacia do rio Iguaçu.

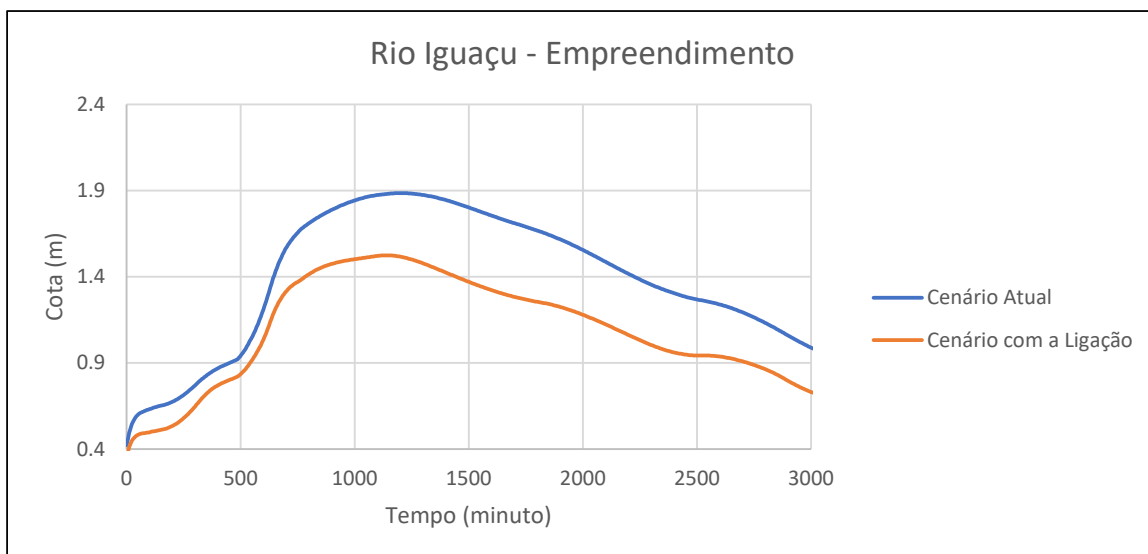


Figura 2.58 - Cotagrama do rio Iguaçu, no trecho do empreendimento.

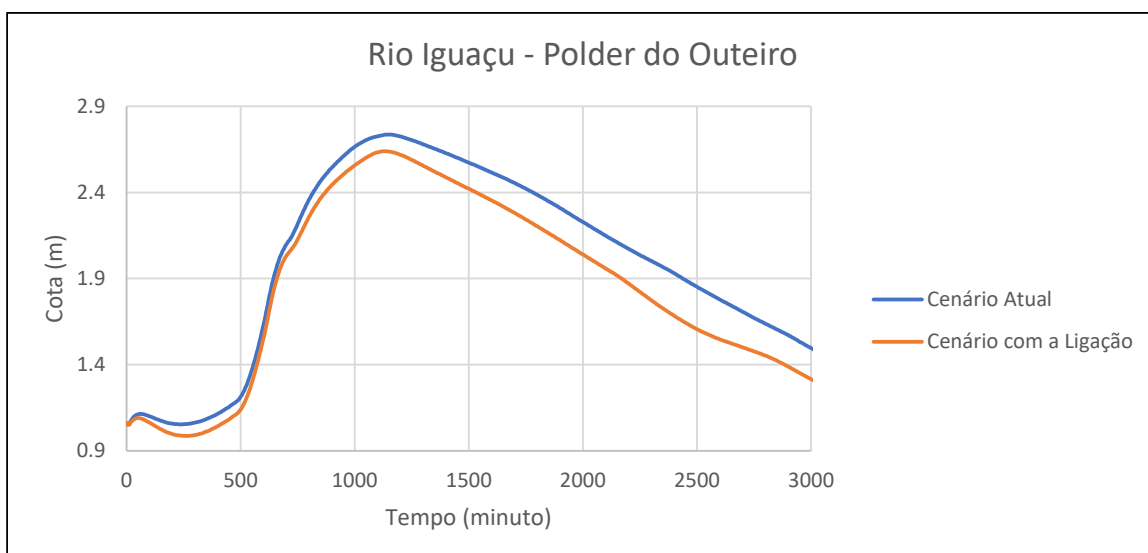


Figura 2.59 - Cotagrama do rio Sarapuí, no trecho do Pôlder Outeiro.

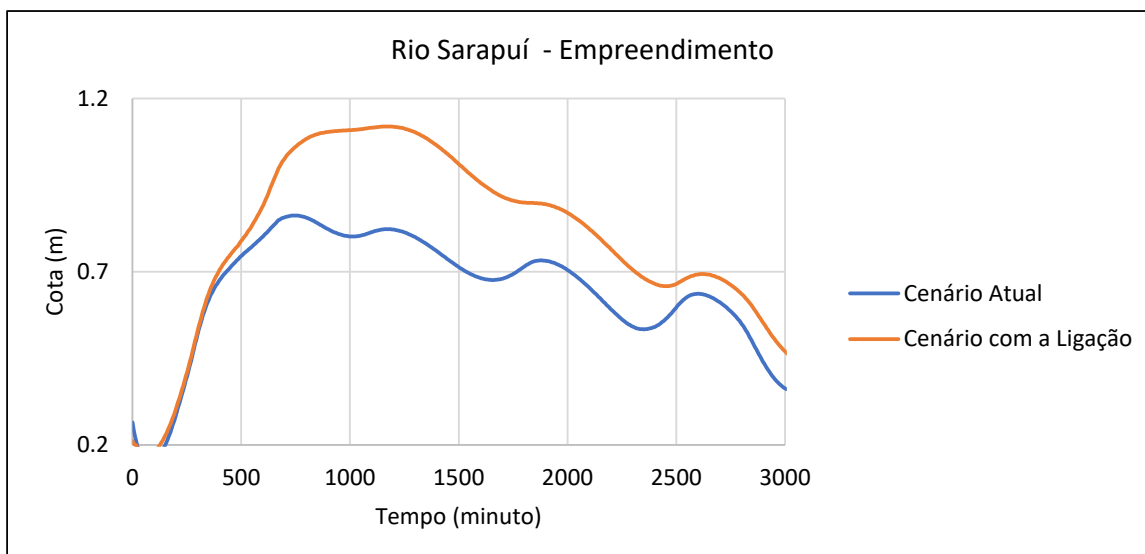


Figura 2.60 - Cotagrama do rio Sarapuí, no trecho do empreendimento.

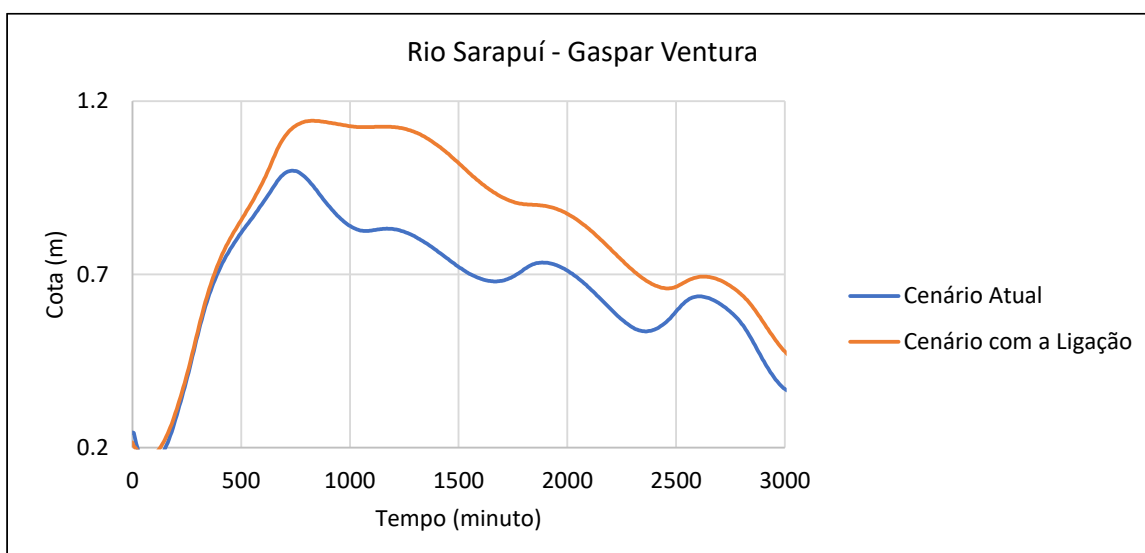


Figura 2.61 - Cotagrama do rio Sarapuí, no trecho do Gaspar Ventura.

O gráfico da Figura 2.62 apresenta a comparação dos níveis máximos de ambos os rios junto ao empreendimento.

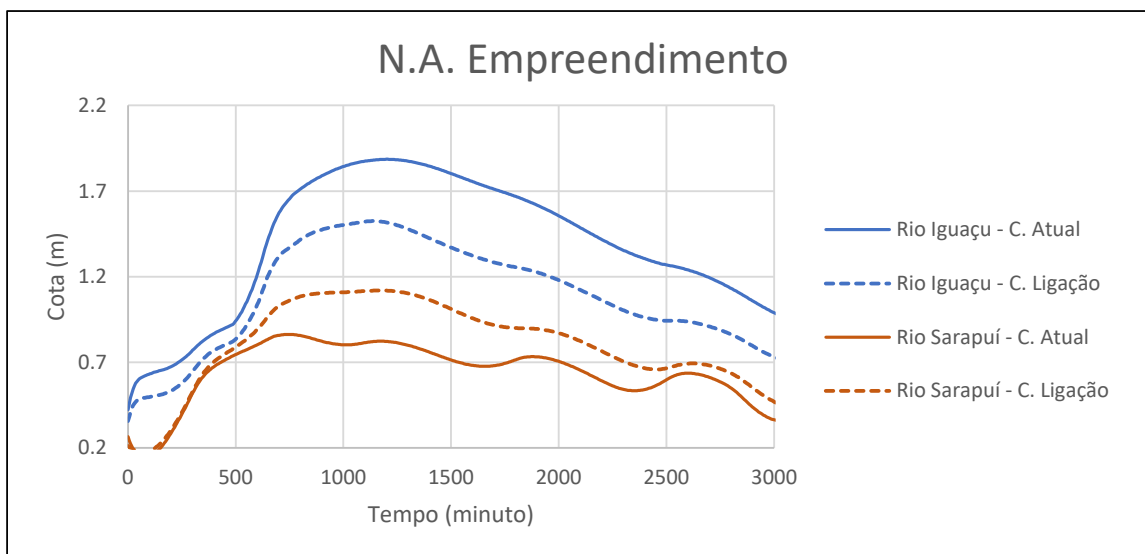


Figura 2.62 – Comparação dos cotogramas dos rios Iguaçu e Sarapuí, no trecho do empreendimento.

A Figura 2.63 e a Figura 2.64 apresentam a diferença no perfil longitudinal dos rios Iguaçu e Sarapuí para os cenários simulados.

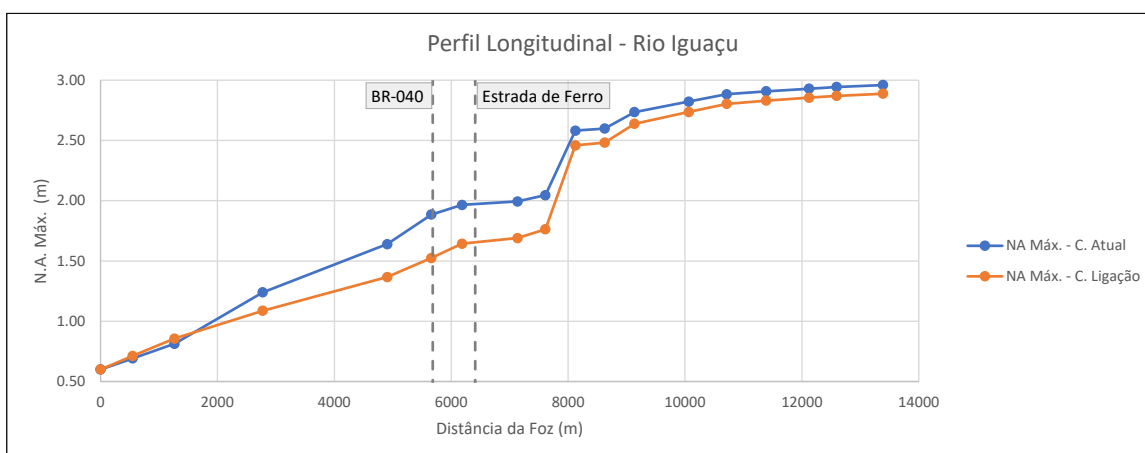


Figura 2.63 – Perfil Longitudinal do rio Iguaçu para o cenário atual e para o cenário com ligação, considerando uma chuva crítica de TR 50 anos na bacia do rio Iguaçu.

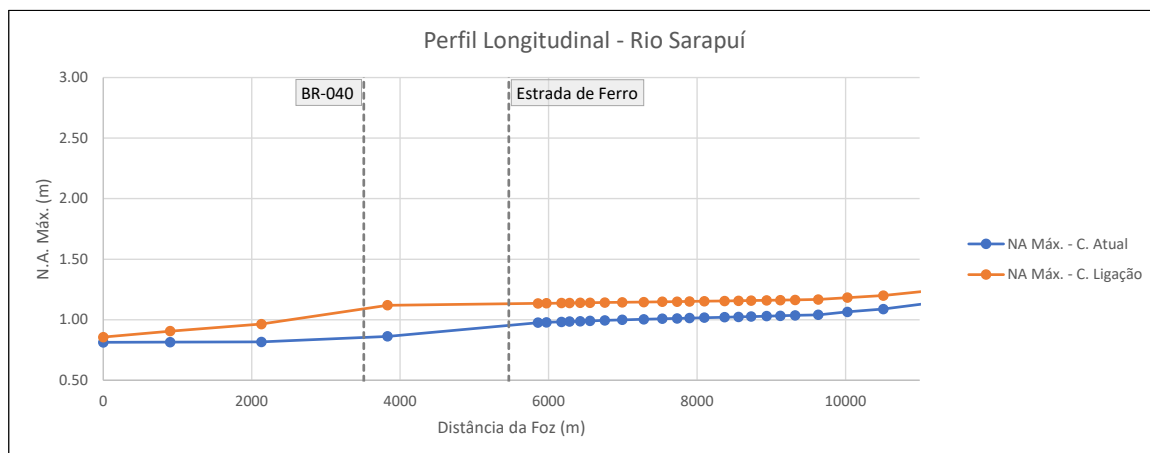


Figura 2.64 – Perfil Longitudinal do rio Sarapuí para o cenário atual e para o cenário com ligação, considerando uma chuva crítica de TR 50 anos na bacia do rio Iguaçu.

A Figura 2.65 apresenta a mancha de inundação no trecho final dos rios Iguaçu e Sarapuí para o cenário atual e a Figura 2.66 apresenta a mancha para o cenário com a ligação. A Figura 2.67 apresenta as diferenças nos níveis d'água máximos entre os dois cenários.

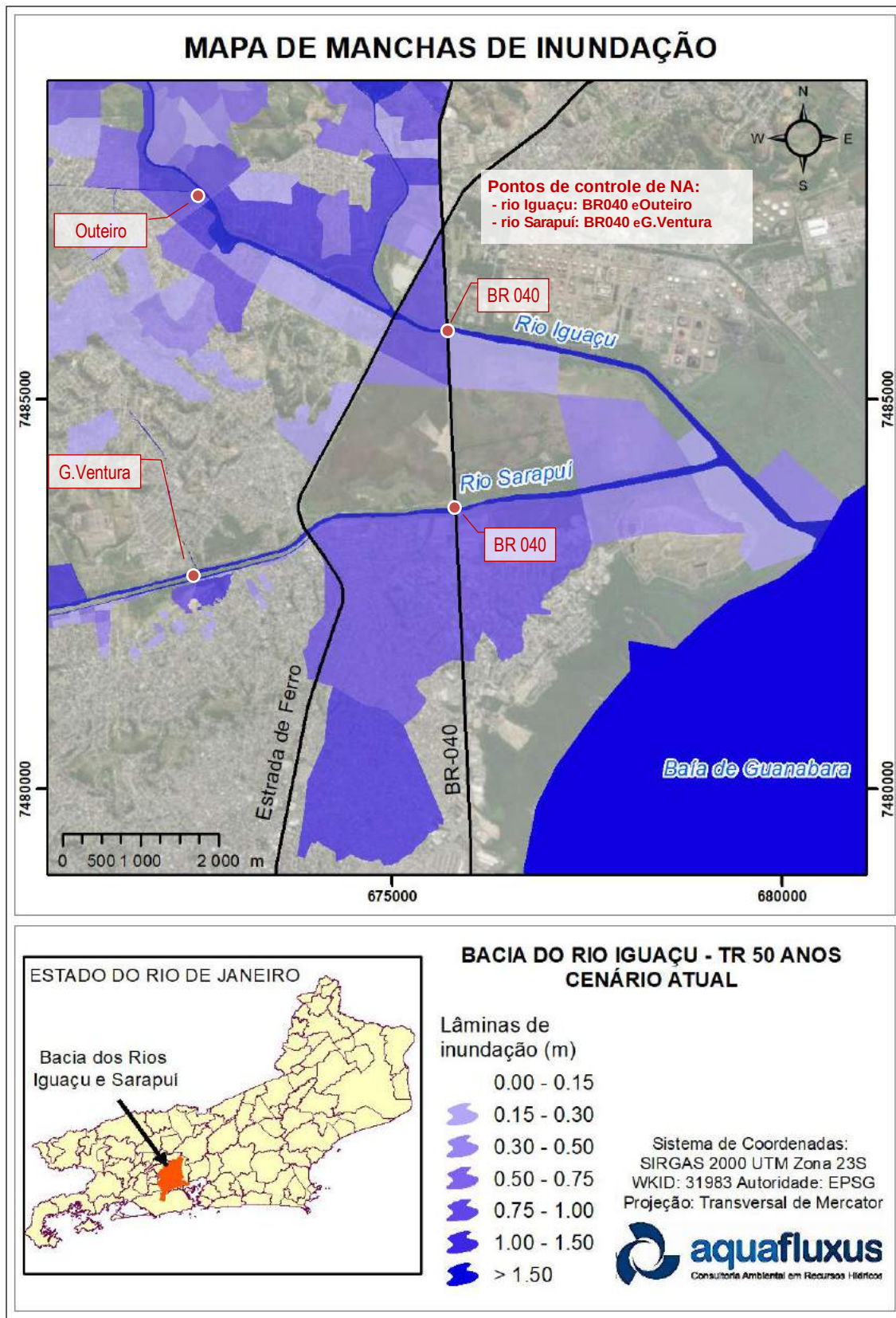


Figura 2.65 – Mancha de inundação do Cenário Atual para a chuva crítica na bacia do rio Iguaçu com Tempo de Recorrência de 50 anos.

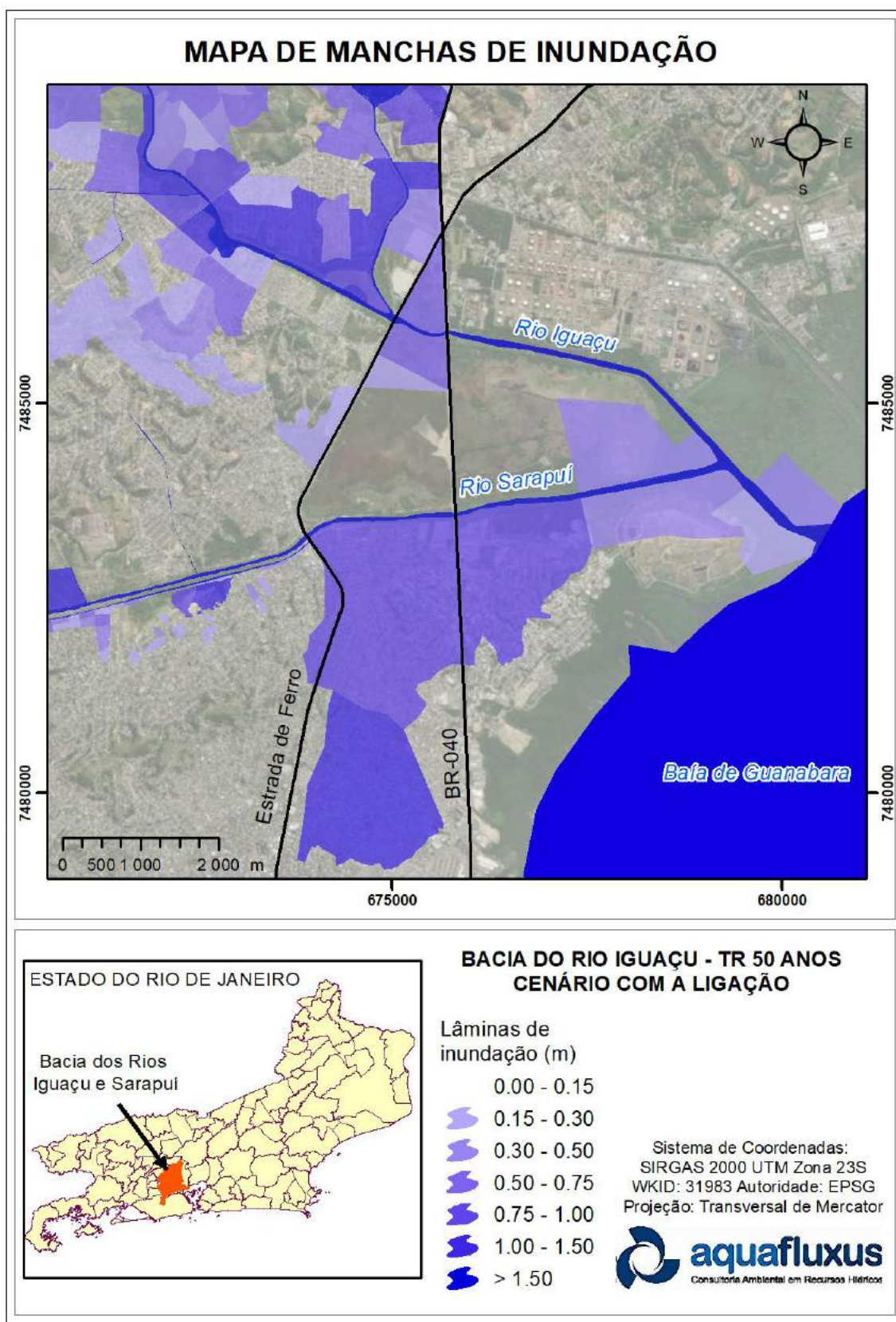


Figura 2.66 – Mancha de inundação do Cenário com ligação para a chuva crítica na bacia do rio Iguaçu com Tempo de Recorrência de 50 anos.

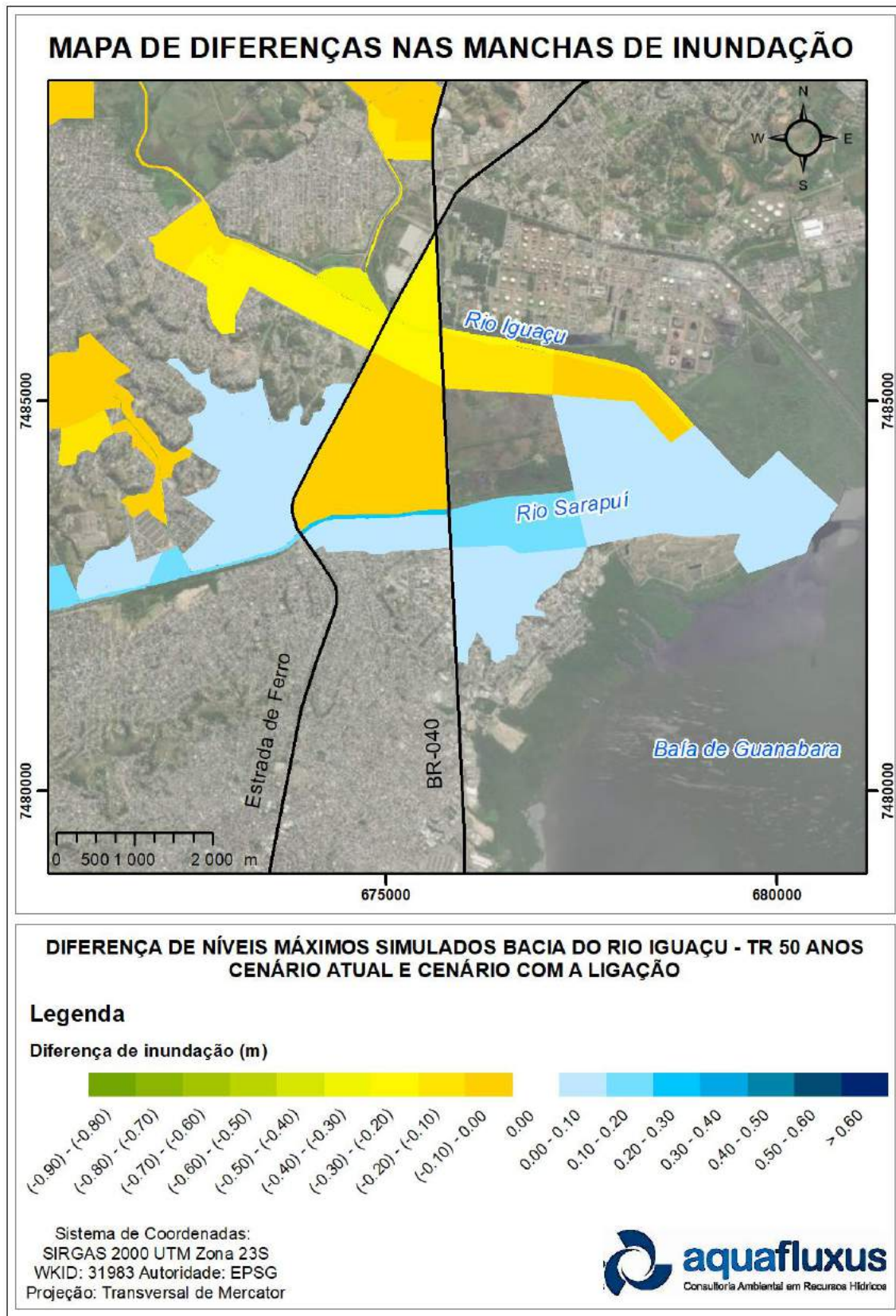


Figura 2.67 – Comparação entre a diferença nos alagamentos para os cenários simulados considerando uma chuva crítica na bacia do rio Iguaçu com Tempo de Recorrência de 50 anos.

Conclusão: É possível observar que os níveis máximos no rio Iguaçu reduziram em 36cm (junto ao empreendimento) e 10cm (junto ao Outeiro), gerando uma elevação no rio Sarapuí de 26cm (junto ao empreendimento) e 14cm (junto ao Gaspar Ventura).

Ao se analisar os níveis d'água do rio Iguaçu quando essa bacia está sujeita a temporais, podemos concluir que o canal de interligação possibilita as reduções de NA nos dois pontos de controle mais críticos observados na Tabela 2.8.

Tabela 2.8 – Avaliação dos efeitos do canal de ligação.

Funcionamento do canal para uma chuva na bacia do rio Iguaçu				
Temporais na bacia do Iguaçu		TR 10	TR 25	TR 50
Pontos de Controle	Junto a BR 040	Abaixa 34 cm	Abaixa 36 cm	Abaixa 36 cm
	Junto ao Pôlder do Outeiro	Abaixa 14 cm	Abaixa 11 cm	Abaixa 10 cm

3. Considerações Finais

O agravamento das inundações de áreas urbanas regularmente ocupadas na Baixada Fluminense é, indubitavelmente, uma consequência do:

- (1) crescimento desordenado da zona habitada;
- (2) constante desobediência aos Planos Diretores Municipais;
- (3) ocupação de áreas de risco; e
- (4) ocupação de áreas destinadas ao espraio natural das águas.

A Baixada Fluminense tem características bastante particulares, que deveriam forçar um rígido regramento na forma de ocupação de seu território urbano e rural. Apesar dessa necessidade de regramentos para o uso do solo, o que se observa é ainda uma expansão semi-controlada do perímetro urbano, na melhor das hipóteses, sem um planejamento integrado dos itens relacionados à habitação, ao meio ambiente, à mobilidade, à drenagem e ao lazer. O que se observa é uma expansão urbana desacompanhada de uma infraestrutura municipal adequada e de serviços públicos eficientes.

A reversão desse quadro é tarefa difícil, mas dever de todos que buscam um desenvolvimento econômico socialmente mais justo.

No que se relaciona à mitigação de cheias, a Baixada Fluminense tem uma macrorregião em situação bastante crítica, onde se localizam milhares de famílias sob constante risco de alagamentos. Dentro dessa macrorregião há um bairro de Caxias, chamado São Bento, para o qual uma solução de drenagem precisa ser encontrada visando o bem de seus mais de vinte mil habitantes.

A construção do mencionado canal de interligação Sarapuí-Iguaçu, paralelo à Estrada de Ferro do 1º e 2º Distrito, pode aumentar bastante a resiliência dessa macrorregião ambientalmente fragilizada e facilitar o encontro de solução para a drenagem do bairro São Bento, uma vez que reduz os tempos em que o NA do rio Iguaçu permanece acima da cota 1,0 metro em 14 horas para o TR 25 anos e em 10 horas para o TR 50 anos, em seu trecho junto à região onde deveria existir o Polder do Bairro São Bento.

Ao se analisar os níveis d'água do rio Iguaçu quando essa bacia está sujeita a temporais, podemos concluir que o canal de interligação possibilita importantes reduções de nível d'água do rio Iguaçu para todo o trecho abaixo do Polder do Outeiro. Similarmente, ao se analisar os níveis d'água do rio Sarapuí quando essa bacia está sujeita a temporais, podemos concluir que o canal de interligação possibilita reduções de níveis d'água do rio

Sarapuí para todo o trecho abaixo do Canal Gaspar Ventura. A Tabela 3.1 apresenta os níveis máximos do rio Sarapuí, junto ao empreendimento, para os cenários modelados e a Tabela 3.2 apresenta os níveis máximos do rio Iguaçu, junto ao empreendimento, para os cenários modelados.

Tabela 3.1 – Níveis d'água máximos junto ao Empreendimento no rio Sarapuí.

Níveis de Água no Rio Sarapuí a jusante da Estrada de Ferro						
Cenários	Atual			Com ligação		
	TR 10	TR 25	TR 50	TR 10	TR 25	TR 50
Temporais na bacia do Rio Iguaçu	0.82	0.85	0.86	1.01	1.07	1.12
Temporais na bacia do Rio Sarapuí	1.42	1.52	1.62	1.28	1.36	1.44

Tabela 3.2 – Níveis d'água máximos junto ao Empreendimento no rio Sarapuí.

Níveis de Água no Rio Iguaçu a jusante da Estrada de Ferro						
Cenários	Atual			Com ligação		
	TR 10	TR 25	TR 50	TR 10	TR 25	TR 50
Temporais na bacia do Rio Iguaçu	1.69	1.81	1.89	1.35	1.45	1.52
Temporais na bacia do Rio Sarapuí	1.14	1.17	1.19	1.22	1.29	1.35

E é nessa região que se localiza a zona mais ambientalmente fragilizada da Baixada, onde se localiza o bairro São Bento, situado imediatamente a montante do Campo do Bomba, na margem direita do rio Iguaçu.

Nesse sentido, para uma tempestade na bacia do Iguaçu de TR 25 anos ou uma chuva de TR 25 anos na bacia do Sarapuí, o rebaixamento do nível máximo das cheias seriam: 36 centímetros no Iguaçu e 17 centímetros no Sarapuí, conforme observado na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Avaliação dos efeitos do canal de ligação junto ao bairro São Bento.

Nível d'água máximo junto ao São Bento / BR 040			
Tempo de Recorrência dos Temporais	TR 10	TR 25	TR 50
Temporais na bacia do Rio Iguaçu	Abaixa 34 cm	Abaixa 36 cm	Abaixa 36 cm
Temporais na bacia do Rio Sarapuí	Abaixa 14 cm	Abaixa 17 cm	Abaixa 19 cm

4. Referências Bibliográficas

- COPPE/UFRJ -PNUD. Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia dos Rios Iguaçu/Sarapuí, com Ênfase no Controle de Inundações. Estudos Hidrológicos IG-RE-009-R1 – SERLA, Rio de Janeiro, 1994.
- COPPE/UFRJ -PNUD. Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia dos Rios Iguaçu/Sarapuí, com Ênfase no Controle de Inundações. Modelagem Hidrodinâmica dos rios Iguaçu e Sarapuí IG-RE-028-R0 – SERLA, Rio de Janeiro, 1996.
- COPPE/COPPETEC – UFRJ. Estudos Integrados para Avaliação de Projeto de Intervenção na Calha do Rio Acari – RJ. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Fundação COPPETEC, 2007.
- COPPE/COPPETEC – UFRJ. Plano Diretor de Recursos Hídricos, Controle de Inundações e Recuperação Ambiental da Bacia do Iguaçu/Sarapuí. Análise do comportamento hidrológico e hidrodinâmico da bacia hidrográfica do rio Botas - Iguaçu na Baixada Fluminense PDIS-RE-009-R1 – SERLA, Rio de Janeiro, 2009.
- SOUSA, M. M. Comparação entre ferramentas de modelagem unidimensional e quasi-bidimensional, permanente e não-permanente, em planejamento e projetos de engenharia hidráulica. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, 2010.
- MAGALHÃES, L. P. C., MAGALHÃES, P. C., MASCARENHAS, F. C. B., MIGUEZ, M. G., COLONESE, B. L., & BASTOS, E. T. Sistema HIDRO-FLU para apoio a Projetos de Drenagem. XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. ABRH, João Pessoa, 2005.
- MARQUES, L.S.; SOUSA, M. M.; MIGUEZ, M. G.; MAGALHÃES, P. C.; OLIVEIRA, L.F.S.; ARRAIS, C.M.; BIGATE, I.L.; VERÓL, A.P.; OLIVEIRA. Elaboração e Calibração de Um Modelo Hidrodinâmico Para Simulação De Cheias Fluviais Na Bacia Dos Rios Iguaçu E Sarapuí Com Uso Do Modcel. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Florianópolis – SC, 2017.
- MIGUEZ, M. G. Manual do Modelo Matemático de Células de Escoamento para Bacias Urbanas. 2001B. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2001.

ANEXO 1 – SISTEMA DE MODELAGEM

Sistema HIDROFLU para Auxílio a Projetos de Drenagem

No HIDROFLU, o cálculo de um hidrograma a partir de um hietograma de projeto é dividido em quatro etapas principais:

- Caracterização da Bacia Hidrográfica;
- Hietograma de Projeto;
- Separação dos Escoamentos;
- Hidrograma de Projeto.

Estas etapas são representadas no esquema da Figura A2.1 a seguir que descreve a sequência metodológica para o cálculo das vazões de cheia em uma bacia hidrográfica.

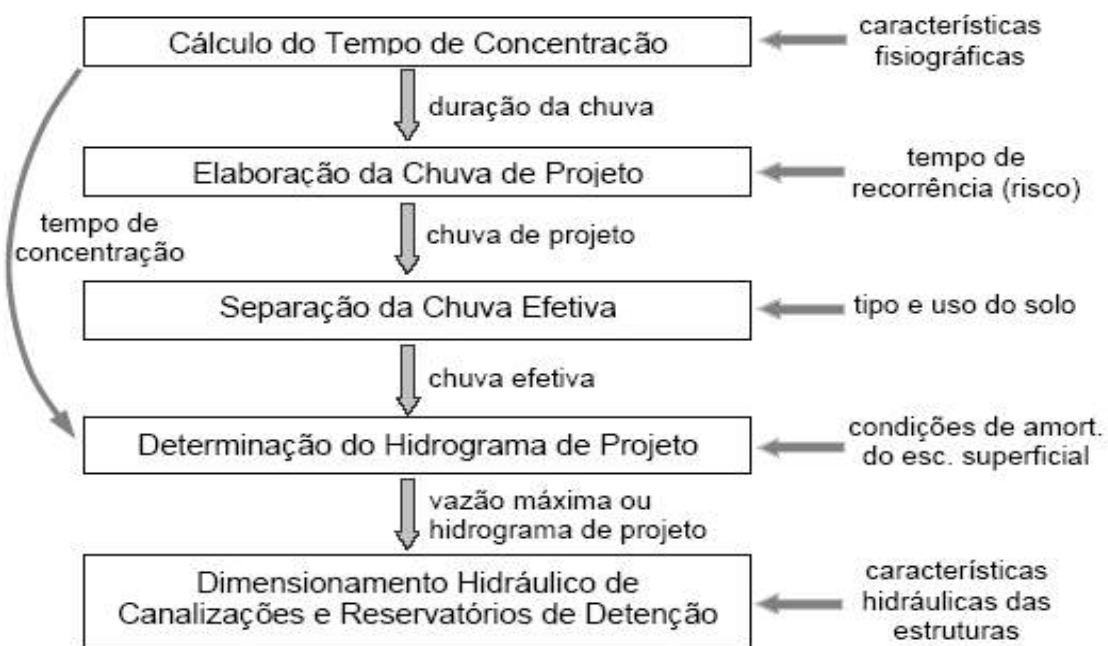


Figura A2.1 – Etapas de cálculo do HIDROFLU

Caracterização da Bacia Hidrográfica

Nesta etapa, que tem como objetivo a definição do tempo de concentração a ser utilizado, o modelador deve informar apenas as características físicas da bacia hidrográfica em estudo, que envolvem as seguintes variáveis:

- Área de Drenagem da Bacia Hidrográfica, em km² (A);
- Extensão do Curso d'Água Principal, em km (L);
- Declividade do Curso d'Água Principal, em m/m (S);
- Desnível entre o ponto mais elevado e o exutório, em metros;
- Velocidade Média do Escoamento no Curso d'Água Principal, em m/s (v);
- Vazão de Base, em m³/s (Qb);
- Coeficiente de Cobertura Vegetal (p);

A partir das características disponíveis fornecidas pelo modelador, o programa calcula automaticamente o tempo de concentração da bacia hidrográfica utilizando equações empíricas disponíveis na literatura técnica, apresentadas na Tabela A2 1. Os resultados servem de apoio para o modelador arbitrar um valor para o tempo de concentração da bacia hidrográfica de acordo com a fórmula que julgar pertinente ao caso.

Tabela A2 1. Equações para cálculo do Tempo de Concentração – HIDROFLU.

Nome	Equação
Cinemática	$t_c = \sum \frac{L}{v}$
Dooge	$t_c = 21,88 \frac{A^{0,41}}{S^{0,385}}$
Kirpich	$t_c = 3,99 \frac{L^{0,77}}{S^{0,385}}$
George Ribeiro	$t_c = \frac{16L}{(1,05 - 0,2p)(100S)^{0,04}}$

Hietograma de Projeto

Neste módulo é possível definir a chuva que será usada e a sua distribuição no tempo e no espaço. A precipitação a ser considerada na simulação poderá ser calculada a partir de equações de chuvas intensas (Equação do tipo Otto Pfafstetter ou Equação Clássica de Chuvas Intensas) ou poderá ser utilizada uma sequência de chuva qualquer, como em casos de simulação de eventos já ocorridos, requerendo apenas a entrada direta dos valores de altura de chuva.

Desta forma, para a determinação das precipitações a partir de equações de chuvas intensas, podem ser usadas as seguintes opções:

Equação do Tipo Otto Pfafstetter (PDF)

Equação desenvolvida para diversos locais do Brasil, onde foram coletados dados de chuvas intensas, registrados em 98 pluviógrafos de postos pluviométricos. Apresenta-se na forma de precipitação x duração x frequência (PDF). A equação empírica escolhida para definir as precipitações máximas em função de sua duração e tempo de recorrência possui a seguinte representação analítica:

$$P = T_R^{\left(\alpha + \frac{\beta}{T_R^\gamma}\right)} \times [at + b \log(1 + ct)]$$

Onde:

P – Precipitação máxima em mm;

T – tempo de recorrência em anos;

t – duração da precipitação em horas;

α, β – valores que dependem da duração da precipitação;

γ, a, b, c – valores constantes para cada posto.

O parâmetro alfa (α) e beta (β) correspondem a um conjunto de valores dependentes da duração da precipitação, que já estão incorporados ao sistema; o parâmetro T_R é o tempo de recorrência da chuva, informado pelo usuário; o parâmetro gama (γ) é uma constante e os outros parâmetros variam de acordo com o local em estudo. O sistema possui uma base de dados com valores para esses parâmetros em diversas regiões brasileiras.

Equação Clássica de Chuvas Intensas (IDF)

A equação clássica de chuvas intensas apresenta-se na forma intensidade x duração x frequência (IDF). Seus parâmetros podem ser ajustados para cada local onde exista posto pluviográfico com dados disponíveis, possuindo diversas referências na literatura técnica. O sistema HIDROFU possui uma base de dados com valores para esses parâmetros em algumas regiões brasileiras.

A equação é dada por:

$$i = \frac{k \times T_R^a}{(t + c)^b}$$

Onde:

i – intensidade da chuva a cada intervalo de tempo;

P – altura de chuva a cada intervalo de tempo;

TR – tempo de recorrência do evento em anos;

t – intervalo de tempo.

Complementando a entrada de dados necessários para a elaboração da chuva de projeto, devem ser definidos pelo usuário a Duração da Chuva, em minutos; o Número de Intervalos de Tempo da chuva e o Número de Subdivisões do Intervalo de Tempo, para uma melhor discretização do hidrograma que será gerado na etapa seguinte. Nesta mesma etapa, deve-se definir também como será feita a Distribuição Temporal da Chuva, para o caso da geração da chuva de projeto a partir de uma das equações de chuvas intensas disponíveis.

O sistema possui duas opções para esta distribuição:

- Método do Bureau of Reclamation

O Método do *Bureau of Reclamation* redistribui as alturas de chuva em diferentes intervalos de tempo, até completar a duração da chuva de projeto. As chuvas são distribuídas de forma que o maior valor fique no intervalo de tempo central, e as demais precipitações são alocadas, alternadamente, nos intervalos de tempo seguintes, em ordem decrescente.

- Chuva Constante no Tempo

Para a forma de chuva constante é feita uma média das alturas de chuva geradas para cada intervalo de tempo por uma das equações, e adota-se esta média como a altura de chuva por toda a sua duração.

Com relação à distribuição espacial da chuva na bacia, o usuário pode utilizar a opção de redução do volume de chuva gerada em função da área de drenagem da bacia. O sistema faz essa redução baseada no cálculo do coeficiente de redução, através de uma equação ajustada para algumas bacias de médio porte. A equação apresenta-se da seguinte forma (com A = área de drenagem):

$$c = -0,0915 \times \ln(A) + 1,1894$$

Separação dos Escoamentos

Nesta etapa, o modelador deve optar por um método para a representação da divisão entre a parte da chuva que infiltra e a parte que contribui para o escoamento superficial.

O HIDROFLU possui três métodos implementados, que manipulam parâmetros dos principais fenômenos hidrológicos atuantes na separação do escoamento superficial em bacias de pequeno e médio porte: a infiltração, a retenção em depressões do terreno e a interceptação vegetal. Como os parâmetros relativos à evapotranspiração e ao escoamento subterrâneo são irrelevantes em bacias de pequeno e médio porte, estes são desprezados nos métodos de separação de chuva efetiva. As opções são: Método Racional, Método dos Índices e Método do *Soil Conservation Service* (SCS), sendo o último utilizado neste estudo.

O método do SCS tem como premissa a razão entre o volume infiltrado e a capacidade de infiltração como sendo diretamente proporcional à razão entre a chuva excedente e a precipitação total. Matematicamente, esta premissa pode ser expressa por:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a + S)}$$

sendo:

$$I_a = k \times S$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

Onde:

P_e – Chuva excedente;
 P – Chuva;
 I_a – Abstração Inicial;
 S – Armazenamento no Solo.

O coeficiente k expressa uma porcentagem do armazenamento e o CN, que pode variar de 0 a 100, representa as características do solo e do uso da terra. A Tabela A2 2 e a Tabela A2 3 apresentam valores do CN para bacias rurais e urbanas, de acordo com os tipos de solo e condições de umidade listados a seguir, para diferentes padrões de uso do solo. A Tabela A2 4 correções nos valores de CN para outras condições iniciais de umidade.

Tipos de Solo

Solo A: solos que produzem baixo escoamento superficial e alta infiltração. Solos arenosos profundos com poço silte e argila.

Solo B: solos menos permeáveis do que o anterior, solos arenosos menos profundos do que o tipo A e com permeabilidade superior à média.

Solo C: solos que geram escoamento superficial acima da média e com capacidade de infiltração abaixo da média, contendo porcentagem considerável de argila e pouco profundo.

Solo D: solos pouco profundos contendo argilas expansivas e com muito baixa capacidade de infiltração, gerando a maior proporção de escoamento superficial.

Condições de umidade

AMC I: situação em que os solos estão secos. Na estação de crescimento, a precipitação acumulada dos cinco dias anteriores é menor que 36 mm e em outro período, menor que 13 mm.

AMC II: situação média em que os solos correspondem à umidade da capacidade de campo.

AMC III: situação em que ocorreram precipitações consideráveis nos cinco dias anteriores e o solo encontra-se saturado. No período de crescimento, as precipitações acumuladas nos cinco dias anteriores, são menores que 53 mm e no outro maior que 28mm.

Tabela A2 2. Valores do CN para Bacias Hidrográficas Rurais.

Uso do Solo	Superfície	A	B	C	D
Solo lavrado	Com sulcos retilíneos	77	86	91	94
	Em fileiras retas	70	80	87	90
Plantações regulares	Em curvas de nível	67	77	83	87
	Terraceado em nível	64	76	84	88
	Em fileiras retas	64	76	84	88
Plantações de cereias	Em curvas de nível	62	74	82	85
	Terraceado em nível	60	71	79	82
	Em fileiras retas	62	75	83	87
Plantações de legumes ou cultivados	Em curvas de nível	60	72	81	84
	Terraceado em nível	57	70	78	89
	Pobres	68	79	86	89
	Normais	49	69	79	84
	Boas	39	61	74	80
Pastagens	Pobres, em curvas de nível	47	67	81	88
	Normais, em curvas de nível	25	59	75	83
	Boas, em curvas de nível	6	35	70	79
Campos permanentes	Normais	30	58	71	78
	Esparsas, de baixa transpiração	45	66	77	83
	Normais	36	60	73	79
	Densas de alta transpiração	25	55	70	77
Chácaras / Estradas de terra	Normais	56	75	86	91
	Más	72	82	87	89
	De superfície dura	74	84	90	92
Florestas	Muita esparsas, baixa transpiração	56	75	86	91
	Esparsas	46	68	78	84
	Densas, alta transpiração	26	52	62	69
	Normais	36	60	70	76

Tabela A2 3. Valores do CN para Bacias Hidrográficas Urbanas

<i>Uso do Solo</i>	<i>Superfície</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>
Zonas cultivadas	Sem conservação do solo	72	81	88	91
	Com conservação do solo	62	71	78	81
Pastagens ou terrenos baldios	Em más condições	68	79	86	89
	Em boas condições	39	61	74	80
Prado em boas condições		30	58	71	78
Bosques ou zonas florestais	Cobertura ruim	45	66	77	83
	Cobertura boa	25	55	70	77
Espaços abertos, relvados, parques, campos de golf, cemitérios, boas condições	Com relva em mais de 75% da área	39	61	74	80
	Com relva de 50% a 75% da área	49	69	79	84
Zonas comerciais e de escritórios		89	92	94	95
Zonas industriais		81	88	91	93
Zonas residenciais	Área dos lotes	Percentual médio de área impermeável			
	< 500m ²	65%		77	85
	1000m ²	38%		61	75
	1300m ²	30%		57	72
	2000m ²	25%		54	70
	4000m ²	20%		51	68
Parques de estacionamento, telhados, viadutos, etc.		98	98	98	98
Arruamentos e estradas	Asfaltadas e com drenagem de águas pluviais	98	98	98	98
	Paralelepípedos	76	85	89	91
	Terra	72	82	87	89

Tabela A2 4. Correções de CN para outras condições iniciais de umidade

<i>Valores Médios</i>	<i>Valores Corrigidos AMC I</i>	<i>Valores Corrigidos AMC III</i>
100	100	100
95	87	98
90	78	96
85	70	94
80	63	91
75	57	88
70	51	85
65	45	82
60	40	78
55	35	74
50	31	70
45	26	65
40	22	60
35	18	55
30	15	50
25	12	43
20	9	37
15	6	30
10	4	22
5	2	13

Hidrograma de Projeto

A última etapa consiste na transformação da chuva excedente em um hidrograma de projeto. No Hidro-Flu esta etapa é executada através da aplicação do método de Hidrograma Unitário Sintético (HUS) que pode ser interpretado como uma composição entre o Hidrograma Triangular do Método Racional adaptado para chuvas complexas e o Hidrograma Unitário Sintético do SCS.

Como o Hidrograma Triangular do Método Racional superestima a vazão de pico, o programa acrescenta a este uma equação que representa a passagem por um reservatório linear, promovendo assim um amortecimento segundo um coeficiente de depleção (k), calibrado pelo Hidro-Flu para ajustar a vazão de pico à vazão de pico do método do SCS. Este procedimento não só corrige as vazões de projeto, como também reflete o amortecimento do escoamento superficial decorrente do fluxo e do armazenamento deste sobre a superfície da bacia e na calha fluvial.

Esse amortecimento é feito utilizando-se a Equação da Continuidade aplicada a um volume de controle, dada por:

$$I - O = \frac{dS}{dt}$$

E o Princípio do Reservatório Linear:

$$S = KO$$

Onde:

- I – vazão de entrada no reservatório;
- O – vazão de saída do reservatório;
- S – armazenamento no reservatório;
- K – coeficiente de depleção do reservatório linear.

A equação da continuidade é resolvida através do Método das Diferenças Finitas, considerando um esquema explícito e progressivo no tempo, resultando em:

$$O^{t+1} = \left(\frac{\Delta t/K}{2 + \Delta t/K} \right) I^{t+1} + \left(\frac{\Delta t/K}{2 + \Delta t/K} \right) I^t + \left(\frac{2 - \Delta t/K}{2 + \Delta t/K} \right) O^t$$

Assim, o reservatório linear promove o amortecimento do hidrograma e tem seu funcionamento definido pelo valor do Coeficiente de Depleção. De fato, a atuação do reservatório linear é dependente tanto da relação $\Delta t/K$ quanto do próprio Δt . Este parâmetro pode ser definido manualmente ou calibrado automaticamente pelo sistema.

Na etapa de calibração automática deste parâmetro é utilizado um procedimento baseado no Hidrograma Unitário Triangular (HUT) do SCS. Neste método a recessão apresenta duração igual ao produto da ascensão por um Coeficiente Beta (β), usualmente igual a 1,67. A Tabela A2 5 apresenta alguns valores típicos para β .

Tabela A2 5. Valores típicos para o coeficiente β (Wanielista *et al.*, 1997)

Descrição da Bacia	Coeficiente Beta	Razão de Amortecimento
Fórmula do Método Racional	1,00	1,00
Área urbana, alta declividade	1,25	0,89
Valor típico SCS	1,67	0,75
Ocupação mista (urbana e rural)	2,25	0,62
Área rural, alta declividade	3,33	0,46
Área rural, declividade suave	5,50	0,31
Área rural, declividade muito baixa	12,00	0,15

Uma descrição mais detalhada do programa pode ser vista no artigo “Sistema HIDROFLU para apoio a projetos de drenagem” (MAGALHÃES *et al.*, 2005) e no manual do programa.

Modelo de Celas de Escoamento– MODCEL

O MODCEL pode ser descrito como:

(...) um modelo de células urbanas, que integra processos hidrológicos, observado em cada célula, a um modelo hidrodinâmico em loop, em uma representação espacial que interliga fluxo superficial, em canais e em galerias subterrâneas. Por exemplo, ruas podem agir como canais, calçadas como vertedores, edificações, estacionamentos e quarteirões podem funcionar como reservatórios de acumulação. (MIGUEZ, 2001)

O MODCEL é aplicado para modelagem hidrodinâmica de bacias sujeitas a enchentes. Esse modelo parte do princípio de que a bacia pode ser representada por compartimentos interligados, formando uma rede bidimensional. Esses compartimentos são chamados de células de escoamento; assim, a bacia é subdividida em diferentes células interligadas entre si e o escoamento entre as células é calculado por equações hidráulicas unidimensionais definidas de acordo com o padrão topográfico e de urbanização da região, através de relações hidráulicas unidimensionais, id est, equações de vertedor, de orifício, de Saint-Venant, e outras.

A representação da natureza pode ser feita através de células isoladas ou formando um conjunto, a fim de representar a complexidade dos possíveis caminhos das águas em uma inundação. Um conjunto resumido de tipos de células pode eventualmente já fornecer grande capacidade de representação, ao se pensar em suas possíveis associações. Porém, a definição do conjunto de tipos de ligação, que são representativas de leis hidráulicas que traduzem determinados escoamentos, pode fazer grande diferença na tentativa de reproduzir a multiplicidade dos padrões de escoamento de um cenário urbano. Segundo Miguez (2001), as hipóteses de aplicação do modelo de células em bacias urbanas são:

1. A natureza pode ser representada por compartimentos homogêneos, interligados, chamados células de escoamento.
2. Na célula, o perfil da superfície livre é considerado horizontal, a área desta superfície depende da elevação do nível d'água no interior da mesma e o volume de água contido em cada célula é diretamente relacionado com o nível d'água no centro da célula.

3. Cada célula comunica-se com células vizinhas, que são arranjadas em um esquema topológico, constituído por grupos formais, onde uma célula de um dado grupo só pode se comunicar com células deste mesmo grupo, ou dos grupos imediatamente posterior ou anterior.
4. O escoamento entre células pode ser calculado através de leis hidráulicas conhecidas como, por exemplo, a Equação Dinâmica de Saint-Venant.
5. A vazão entre duas células adjacentes, em qualquer tempo, é apenas função dos níveis d'água no centro dessas células.
6. As seções transversais de escoamento são tomadas como seções retangulares equivalentes, simples ou compostas.
7. O escoamento pode ocorrer simultaneamente em duas camadas, uma superficial e outra subterrânea, em galeria, podendo haver comunicação entre as células de superfície e de galeria.

O modelo de células de escoamento possui o seguinte conjunto tipo de células pré-definido:

- ✓ **de rio, ou canal**, por onde se desenvolve o escoamento principal da drenagem a céu aberto, podendo ser a seção simples ou composta;
- ✓ **de galeria**, subterrânea, complementando a rede de drenagem;
- ✓ **de planície**, para a representação de escoamentos a superfície livre em planícies alagáveis, bem como áreas de armazenamento, ligadas umas às outras por ruas;
- ✓ **de reservatório**, simulando o armazenamento d'água em um reservatório temporário de armazenamento, dispondo de uma curva cota x área superficial. A célula tipo-reservatório cumpre o papel de amortecimento de uma vazão afluente.

A variação do volume d'água em uma célula i , em um intervalo de tempo t , é dada pelo balanço de massa nesta célula. Assim, em termos diferenciais, tem-se a equação da continuidade representada a seguir:

$$A_{s_i} \frac{dZ_i}{dt} = P_i + \sum_k Q_{i,k}$$

Onde:

- $Q \rightarrow$ vazão entre as células i e k , vizinhas entre si;
- $Z \rightarrow$ cota do nível d'água no centro da célula i ;
- $A \rightarrow$ área superficial do espelho d'água na célula i ;
- $P \rightarrow$ vazão relativa à parcela de chuva ocorrida sobre a célula i e disponível para escoamento;
- $t \rightarrow$ variável independente relativa ao tempo.

A formulação numérica do modelo proposto inicia-se com o processo de discretização da equação diferencial que, originalmente contínua, passa a ser considerada em termos de incrementos finitos. No caso do modelo de células adotado neste estudo, a discretização temporal da equação diferencial (1), representativa da conservação da massa, é feita procurando-se linearizar numericamente todos os termos que apresentam não-linearidades, para que não haja a necessidade de um procedimento iterativo de solução, a fim de simplificar o modelo numérico.

As ligações são definidas pelo modelador de acordo com as características observadas pela análise topográfica e urbanística da região a ser modelada. Para representar os possíveis escoamentos na bacia durante um evento de inundação, o modelo de células dispõe dos seguintes tipos de ligações:

- ✓ Ligação Tipo-Rio
- ✓ Ligação Tipo-Planície
- ✓ Ligação Tipo-Transição Canal/Galeria (entrada e saída de galerias)
- ✓ Ligação Tipo-Galeria sob Pressão
- ✓ Ligação Tipo-Vertedouro
- ✓ Ligação Tipo-Orifício
- ✓ Ligação Tipo-Descarga de Galeria em Rios ou Canais Principais
- ✓ Ligação Tipo-Bueiros
- ✓ Ligação Tipo-Equação Cota x Descarga (para estruturas especiais calibradas em modelo reduzido)
- ✓ Ligação Tipo-Bombeamento
- ✓ Ligação Tipo-Comporta FLAP

O processo de modelagem por células de escoamento inicia-se pela análise da região através de levantamentos e plantas topográficas, aerofotogrametrias, imagens de satélite e visitas de campo, entre outras fontes de informações disponíveis. Com isso, faz-se a divisão da bacia em células de acordo com o padrão urbano e topográfico da área. Após essa divisão é necessário construir um esquema topológico que integra a rede de células, mostrando as suas interações com as células vizinhas e com as condições de contorno, localizadas nas fronteiras da área modelada. O esquema topológico apresenta a articulação das células e as possíveis interações entre elas, podendo cada célula possuir ligações com outras células de seu próprio grupo, de um grupo anterior ou posterior. A montagem desse esquema faz parte da entrada de dados para permitir a solução numérica do modelo. Na Figura A2.2 são apresentadas as etapas da modelagem hipotética de uma área, desde a topografia até a divisão por grupos.

A esta etapa segue-se a confecção dos arquivos de entrada necessários, que compreendem os dados e parâmetros de cada célula da divisão, suas ligações e as condições de contorno necessárias para a modelagem, assim como a chuva de projeto ou um evento medido.

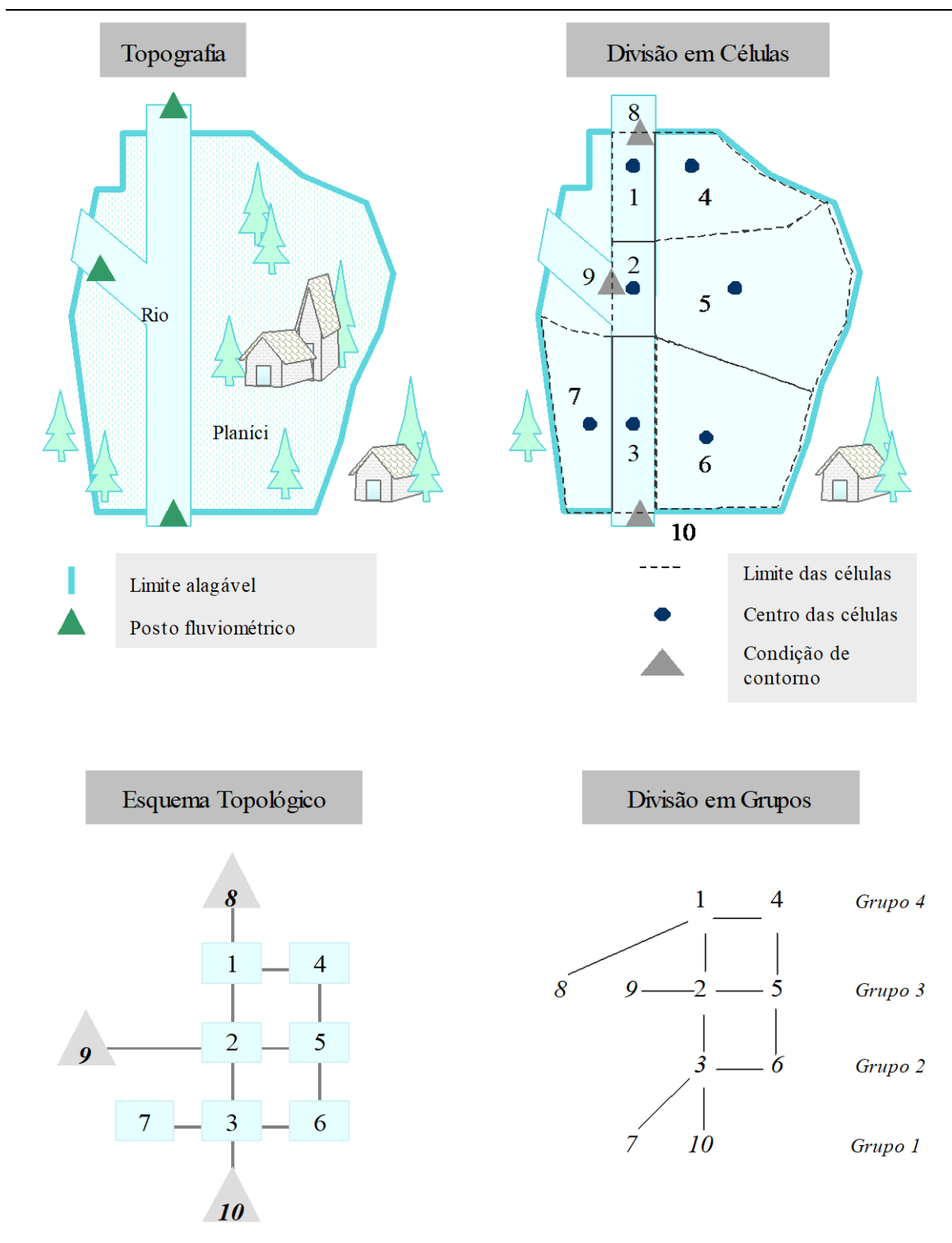


Figura A2.2 – Etapas de modelagem de uma região hipotética