



## ESCOAMENTO ESTOCÁSTICO

### RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA (PIBIC/INPE/CNPq)

Maria Carolina Barbosa Jurema (Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - Unesp, Bolsista PIBIC/CNPq)

E-mail: mariacarolinabj@gmail.com

(continuação do projeto de Patrick Vasconcellos Rodrigues da Silva)

Dr. Solon Venâncio de Carvalho (Laboratório Associado de Computação e Matemática Aplicada (LAC), Orientador)

E-mail: solon@inpe.br

Dr. Leonardo Bacelar Lima Santos (Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden/MCTI), Orientador)

E-mail: santoslbl@gmail.com

Julho de 2017

# Sumário

<b>1. Resumo.....</b>	<b>3</b>
<b>2. Introdução.....</b>	<b>3</b>
<b>3. Materiais e Métodos.....</b>	<b>4</b>
<b>4. Desenvolvimento.....</b>	<b>5</b>
<b>4.1. Extração de rede de drenagem.....</b>	<b>5</b>
<b>4.2. Análise de meandros.....</b>	<b>10</b>
<b>5. Conclusões.....</b>	<b>12</b>
<b>6. Referências Bibliográficas.....</b>	<b>13</b>
<b>7. Anexos.....</b>	<b>13</b>

## 1. Resumo

O presente trabalho teve como objeto de estudo Modelos Digitais de Elevação reais, relativos à região do Vale do Paraíba, aplicados a simulações estocásticas. O projeto, financiado pelo CNPq, iniciou-se em agosto de 2016.

Os processos hidrológicos de maior interesse são relativos à formação de meandros, logo, realizou-se inicialmente um estudo acerca de conceitos hidrológicos, de escoamento e meandros; e conceitos de processos estocásticos, de simulação computacional, com o intuito de complementação conceitual para o decorrer do projeto. Além disso, durante o projeto, foi fundamental exercer a prática da utilização de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), principalmente o *QuantumGIS*, *TerraView*, com a extensão *TerraViewHidro*, desenvolvido pelo INPE, e ambientes de desenvolvimento e compilação para os códigos em Linguagem C. Neste viés, com o aprendizado das ferramentas hidrológicas do *TerraViewHidro*, iniciou-se uma fase no projeto de aprofundamento e testes de delimitações de bacias hidrográficas em algoritmos programados em C++.

Testou-se dois modelos diferentes de escoamento superficial, um com abordagem determinística e outro estocástica. O Modelo Digital de Elevação utilizado neste caso foi da região do Banhado, em São José dos Campos-SP, e o resultado obtido na obtenção das bacias hidrográficas, revela que a abordagem estocástica apresentou maior riqueza de detalhes na delimitação, em comparação à abordagem determinística.

O conhecimento adquirido no estudo de meandros foi importante na observação do mundo real com imagens geradas por satélites. Durante o período do projeto, realizou-se a produção científica de artigos e apresentações em congressos.

## 2. Introdução

O Brasil é um país de proporções continentais, calcula-se uma extensão total na ordem de 8.515.767,049 km<sup>2</sup> (IBGE, 2016), uma população estimada em mais de 190 milhões (IBGE, 2010), contando com a 9ª maior economia (FMI, *World Economic Outlook Database*, 2016), e sendo um dos maiores exportadores de grãos do mundo.

Todos esses números por si só representam a importância do Brasil frente ao cenário internacional; entretanto, um país tão extenso e produtivo, ao mesmo tempo que produz muito alimento, tem um gasto de recursos naturais diretamente proporcional à produção. Isso reafirma a necessidade de manutenção e proteção de seus recursos hídricos, através de leis e projetos de pesquisa.

Tomando como princípio a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a adoção da Bacia Hidrográfica (BH) - e não de limites municipais ou estaduais - como unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. A gestão, pesquisa, monitoramento e alerta de recursos e eventos hidrológicos devem ter como referência, portanto, a Bacia Hidrográfica (Jorge et al., 2015).

A maior frequência de eventos extremos de precipitação, potencialmente agravados pelas mudanças climáticas (Tominaga et al., 2009), levanta a questão da pluralidade de

comportamentos do escoamento superficial. A possibilidade de simular diferentes cenários de risco de inundações, com diferentes conjuntos de áreas inundáveis, aparece como recurso relevante especialmente a políticas públicas ligadas a Desastres Naturais.

O relatório aqui presente tem como objetivo demonstrar as principais atividades realizadas desde o início do projeto de iniciação científica financiado pelo CNPq.

### 3. Materiais e Métodos

O projeto de iniciação científica iniciou-se com um estudo teórico acerca do conceito de Meandros - tipos de canais fluviais em que os rios descrevem curvas sinuosas (CHRISTOFOLETTI, 1981) – com intuito de complementação conceitual para o decorrer do projeto. Além da pesquisa, foi iniciado um processo de treinamento na ferramenta *TerraView*, com a extensão *TerraViewHidro*.

Durante essa etapa, foi dado foco ao uso das Ferramentas Hidrológicas encontradas no *TerraViewHidro*, artifício importante para execução de funcionalidades básicas e importantes de geoprocessamento, tais como direção de fluxo superficial e delimitação de Bacias Hidrográficas. A Figura 1 representa como é visualizada tal função no software.



**Figura 1.** Contorno em vermelho: Ferramentas Hidrológicas *TerraViewHidro*.

Durante essa etapa, foram utilizadas as ferramentas de Extração de Direção de Fluxo, Área Acumulada, Rede de Drenagem, Segmentação das Redes de Drenagem, Vetorização dos segmentos, e Grafos.

Com o término do aprendizado das Ferramentas Hidrológicas do *TerraViewHidro*, iniciou-se uma fase de aprofundamento e testes de Delimitações de Bacias Hidrográficas em algoritmos programados em C++ e compilados no ambiente de desenvolvimento *Falcon C++*. Foram testados dois modelos diferentes de escoamento superficial, sendo que a primeira abordagem é a determinística, do algoritmo “D8” (*deterministic eight neighbours*), de Jenson e Domingue (1988) o mais utilizado na determinação da direção de escoamento em um Modelo Digital de Elevação. Tal algoritmo avalia as células vizinhas à célula em análise e calcula qual a declividade em cada direção cardinal e colateral, atribuindo o fluxo à direção de maior declividade (ou mesmo desnível). Dentre as mais conhecidas alternativas ao D8 estão os algoritmos baseado no MS-Quinn (Quinn et al., 1991), que possibilitam o escoamento multidirecional (MD8) por partição de fluxo em um mesmo evento de precipitação (Paz & Collischonn, 2008). A segunda abordagem para aprofundamento e realização de testes foi o conceito estocástico, tema do projeto, que consiste numa distribuição de probabilidade de um ponto específico contribuir para o exutório, criando

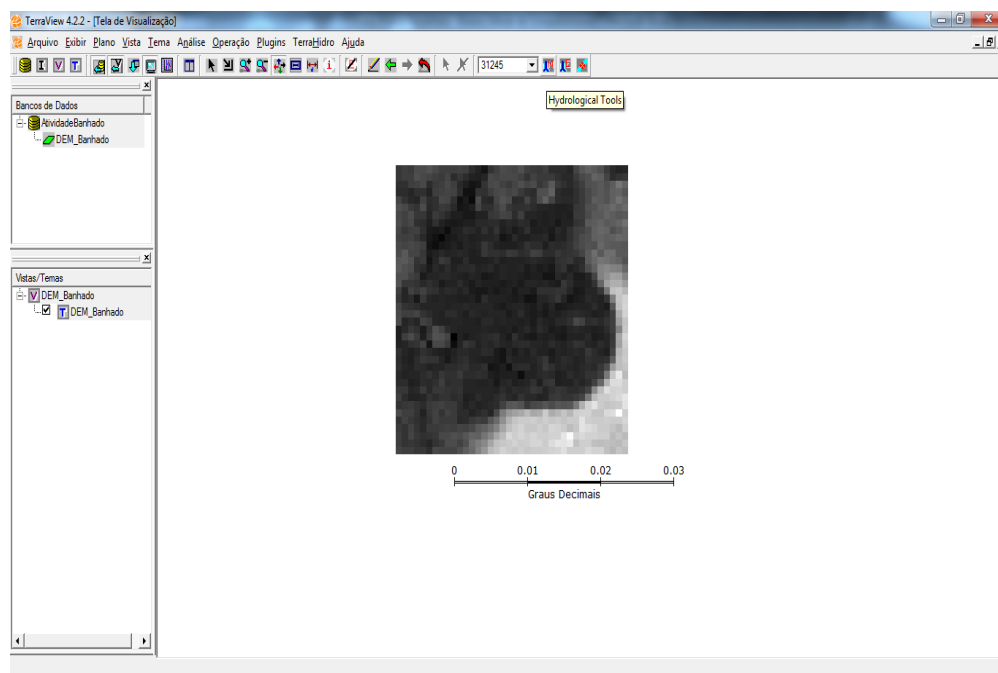
assim uma possível configuração de Bacia Hidrográfica com base na probabilidade em moda e média.

## 4. Desenvolvimento e resultados

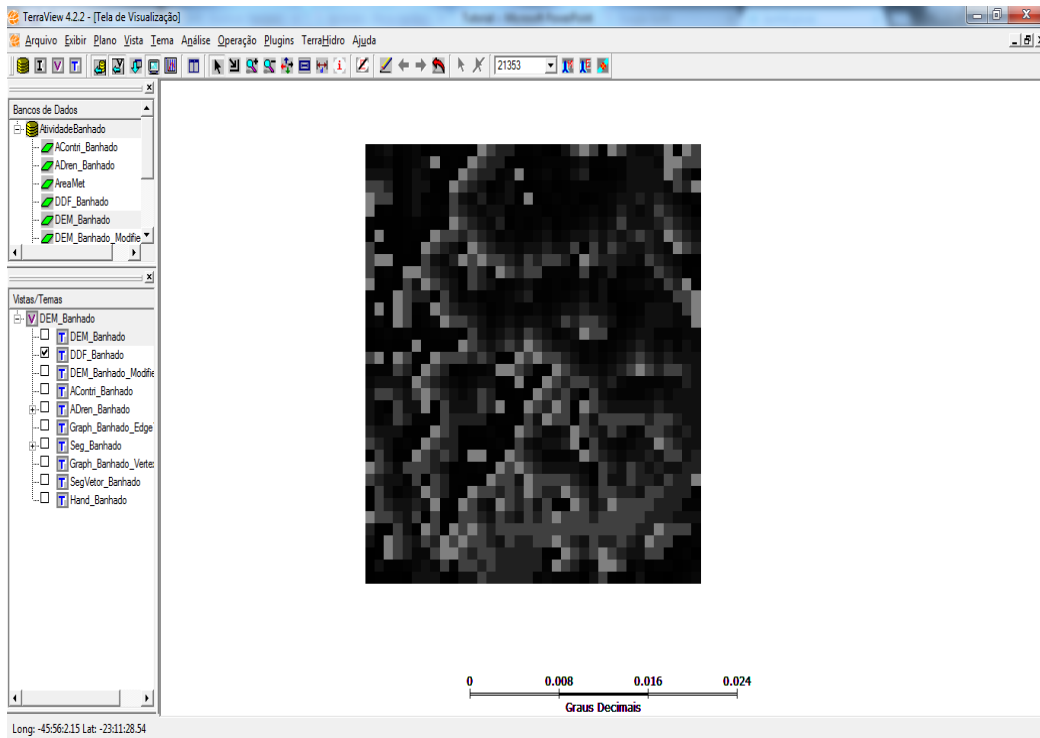
Esta seção dispõe sobre dois tópicos diferentes, que foram os enfoques dados ao tema do projeto.

### 4.1. Extração de rede de drenagem

Durante o processo de aprendizado no software *TerraViewHidro*, com a utilização das ferramentas hidrológicas, foi desenvolvido primeiramente uma Extração de Direção de Fluxo a partir de um Modelo Digital de Elevação de uma área específica, que no caso foi da região do Banhado, no município de São José dos Campos - SP, destacado na Figura 2 e 3.

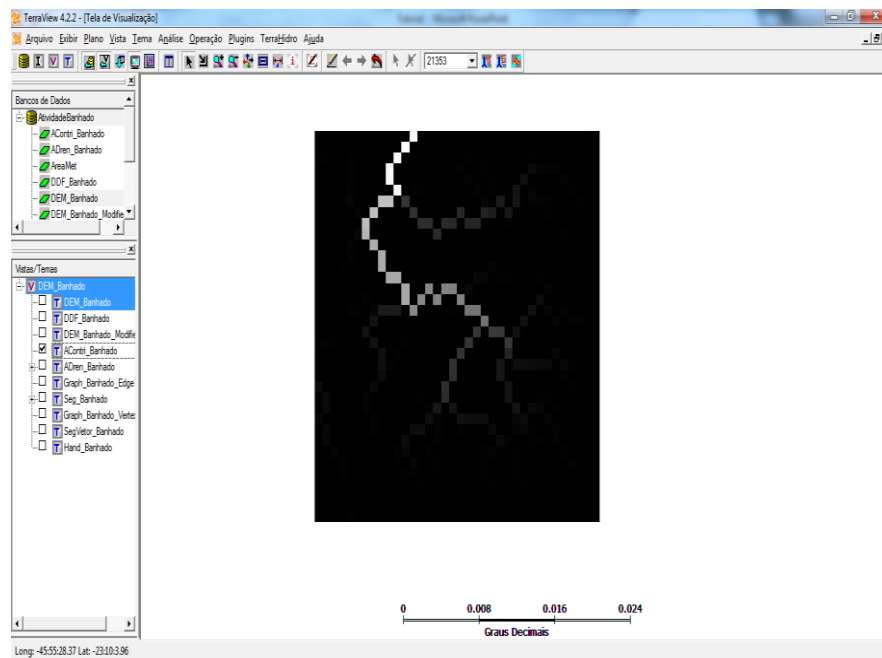


**Figura 2.** Modelo Digital de Elevação importado no *TerraViewHidro*.



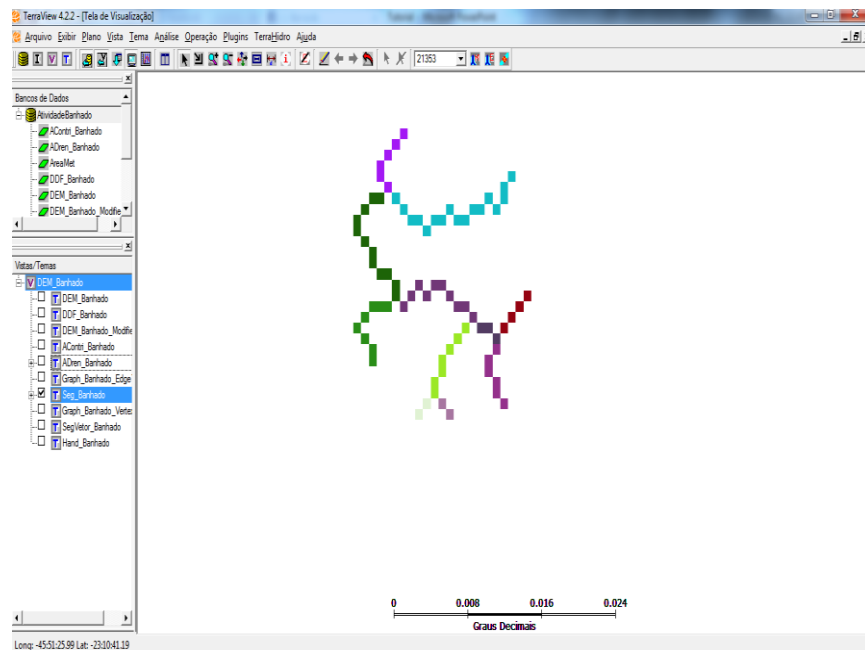
**Figura 3.** Resultado da Direção de Fluxo segundo *TerraViewHidro*.

Em seguida, realizou-se a extração da Área Acumulada referente à região do bairro do Banhado, o que está representado pela Figura 4.

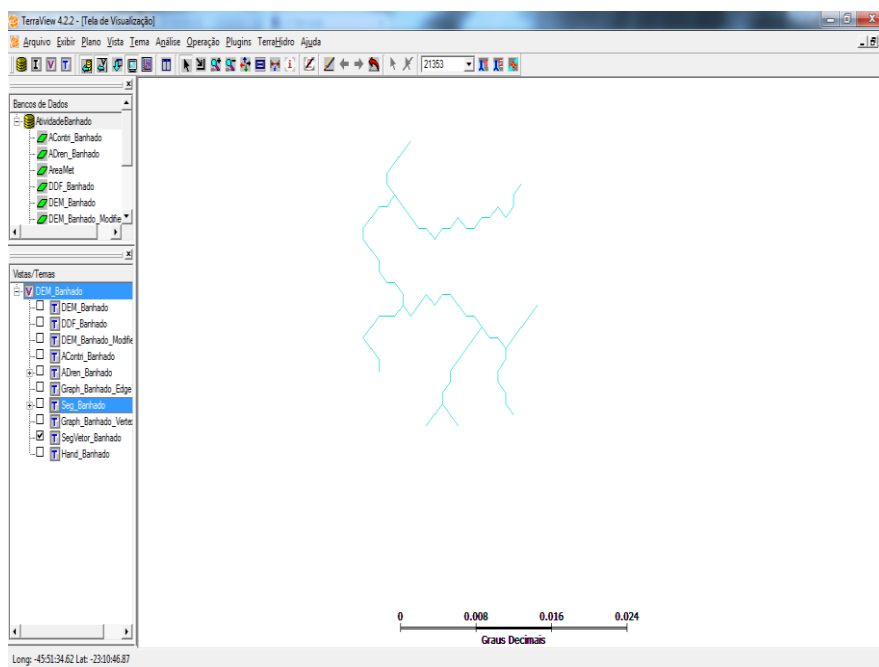


**Figura 4.** Resultado da Área Acumulada.

Com a Área Acumulada, foi efetuada a retirada da Rede de Drenagem que em seguida foi segmentada (Figura 5). Por último essa segmentação foi vetorizada (Figura 6).



**Figura 5.** Rede de Drenagem Segmentada.



**Figura 6.** Rede de Drenagem Vetorizada.

O último passo efetuado no *TerraViewHidro*, foi a criação de um Grafo a partir do modelo de Direção de Fluxo, dessa forma foi possível verificar a tendência de escoamento superficial de cada ponto específico do terreno.

Com o término das atividades supracitadas, deu-se início à etapa de testes para delimitação de Bacias Hidrográficas em algoritmos determinísticos e estocásticos com o ambiente de desenvolvimento *Falcon C++*.

O Modelo Digital de Elevação, destacado na Figura 7, utilizado nessa etapa, continuou sendo da região do Banhado.

DEM:	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
563	565	565	567	572	586	591	574	568	569	568	565	563	559	555	550	552	567	567	570	563	559	560	560	561	560	562	568	572	573	573	572	569	564	559	557	554				
562	564	562	568	568	570	567	564	564	564	565	564	559	556	552	561	564	568	567	566	569	564	563	562	564	559	559	559	557	566	571	574	572	569	563	558	556	557			
562	564	564	569	567	566	564	563	566	559	562	559	556	555	557	567	566	567	567	567	563	561	565	563	563	560	558	558	563	567	569	575	573	566	559	561	562				
560	560	564	565	567	559	563	564	567	564	558	555	552	553	561	567	568	565	563	566	569	566	568	568	562	565	572	563	560	558	561	564	569	570	572	569	573	580	575		
559	559	557	560	560	556	564	565	566	565	569	551	551	561	560	564	567	568	566	567	563	560	559	569	569	574	559	557	557	560	563	567	570	572	570	574	575	571			
566	561	558	557	558	560	567	566	560	551	566	554	549	568	558	557	560	563	562	559	560	568	564	566	559	558	558	560	563	567	573	572	570	574	575	575	575				
569	567	563	561	568	558	560	563	562	558	552	553	555	566	560	560	564	568	562	560	560	561	555	557	557	556	555	555	556	562	563	569	570	574	577	574	577	577			
567	565	568	562	562	567	563	561	558	555	555	553	553	556	562	563	566	565	559	564	557	557	556	555	556	555	556	555	563	563	568	572	572	575	573	571	572				
568	565	567	560	559	555	560	556	554	553	554	555	558	558	558	559	558	558	557	559	558	554	556	555	556	555	556	561	562	572	578	572	578	578	572	572	579				
566	562	564	565	560	554	553	554	550	555	556	559	558	556	560	557	561	555	557	554	556	560	555	555	556	554	558	556	560	564	565	568	574	576	575	569	572	575			
565	564	565	562	558	553	551	548	553	554	556	557	555	556	557	557	558	552	554	558	555	557	557	558	553	557	556	560	564	568	569	574	575	573	574	576	575	575			
567	566	567	566	564	552	550	553	554	556	554	557	556	557	562	559	556	555	555	557	561	559	559	555	559	559	559	561	565	568	570	569	576	572	572	572	572	571			
568	572	566	562	564	556	558	558	556	557	559	557	558	556	562	560	559	562	559	560	568	564	559	562	560	561	562	566	572	578	572	578	578	572	572	572	572	572			
571	572	569	561	562	552	557	563	561	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555		
572	569	568	560	558	554	558	556	559	556	558	558	559	556	557	558	555	557	556	556	557	554	556	554	555	553	559	561	555	557	560	568	574	584	586	584	583	576			
569	569	565	563	554	557	557	558	558	557	556	555	557	556	553	554	555	557	556	555	554	555	555	552	552	558	556	554	554	557	566	584	588	589	592	584	584	584			
570	562	562	561	558	560	558	554	556	556	559	556	554	557	555	555	555	554	555	556	554	557	557	556	557	555	554	562	559	555	555	556	561	576	592	597	591	591			
564	557	565	562	565	561	560	557	559	558	556	558	554	553	553	555	553	555	556	552	556	556	554	560	560	561	561	557	552	554	557	562	580	602	604	599	599	599			
562	557	559	553	562	557	556	557	556	556	555	555	556	553	559	556	556	556	555	554	555	551	552	557	557	559	562	557	552	554	555	558	557	556	561	583	603	607			
566	561	560	559	557	557	557	556	557	557	558	557	557	555	557	557	557	555	554	556	557	557	555	554	557	554	557	553	554	555	556	556	556	554	571	602	608	608			
567	564	564	566	561	559	557	556	559	557	555	558	557	556	557	557	554	556	555	554	555	554	555	553	556	555	557	558	559	557	555	558	559	562	607	606	607	607			
568	557	559	557	565	562	557	556	556	557	557	556	556	555	558	558	556	557	556	556	555	556	554	558	556	555	558	560	567	565	569	560	558	561	564	592	602	602			
555	562	560	554	561	569	565	559	557	556	556	556	556	556	557	556	555	556	554	556	555	559	557	554	555	554	557	558	557	556	555	556	559	564	594	604	604	604			
555	564	568	563	553	563	570	569	566	546	556	554	556	557	558	559	560	556	554	560	556	554	553	556	555	556	554	553	556	556	556	558	554	555	557	562	594	608			
564	559	561	565	552	567	567	563	590	587	562	560	556	558	557	559	557	558	558	559	557	557	556	558	557	557	556	558	558	561	560	587	586	589	567	609	610	609			
560	557	555	557	560	558	556	555	554	556	558	558	557	557	559	558	558	554	552	557	554	557	555	558	556	556	554	557	556	557	558	557	555	566	599	604	604	604			
559	556	558	559	562	561	561	557	556	557	559	560	557	556	555	555	557	556	552	558	556	556	557	559	562	555	557	559	558	556	557	558	558	556	559	601	605	601	605		
560	557	556	558	556	557	557	559	559	560	561	558	558	560	552	553	555	551	554	555	556	558	560	557	558	557	556	558	558	558	558	557	555	562	601	603	603	603			
558	556	557	557	559	561	558	562	560	560	562	559	559	560	559	559	554	555	555	550	556	556	558	558	558	558	555	556	559	557	558	561	561	564	581	604	614	600			
559	559	555	556	559	558	560	564	559	560	560	557	557	556	556	557	556	555	556	557	556	555	561	562	555	556	556	559	561	562	555	556	559	565	576	610	610	606			
562	562	557	558	563	568	562	562	561	560	561	557	557	557	557	557	556	559	557	559	558	559	562	561	557	560	562	561	559	559	561	565	586	601	611	607	608	606			
564	559	556	556	557	561	559	561	561	559	560	555	556	559	557	557	555	558	557	561	558	558	556	557	562	563	561	561	563	566	581	600	605	605	607	609	613				
561	562	563	561	559	563	564	565	563	563	559	556	558	556	557	558	559	565	571	572	570	562	567	568	571	568	571	570	571	581	597	607	612	603	604	605	612				
564	564	561	556	562	565	561	563	559	559	556	558	556	558	557	567	562	590	593	595	600	595	605	596	605	599	603	599	606	607	607	603	603	609	610	620	606				
561	563	563	560	558	561	565	563	563	563	559	562	564	563	563	571	577	588	598	602	605	605	606	604	606	604	605	603	605	605	612	606	605	606	605	605	608				
563	561	565	561	558	563	563	564	565	564	566	565	567	572	574	578	584	594	602	605	607	604	604	606	604	608	607	605	601	604	612	610	608	605	603	603	606				
564	561	566	562	560	561	562	567	567	569	568	571	575	574	580	585	594	600	609	606	608	606	608	606	607	607	613	619	607	607	606	606	600	600	600	600	600				
564	561	562	561	559	557	561	563	568	568	565	569	578	582	586	594	602	604	605	607	605	606	608	608	605	610	613	612	614	602	606	606	602	601	602	601	600	604			

Figura 7. Modelo Digital de Elevação correspondente à região do bairro do Banhado.

Ant



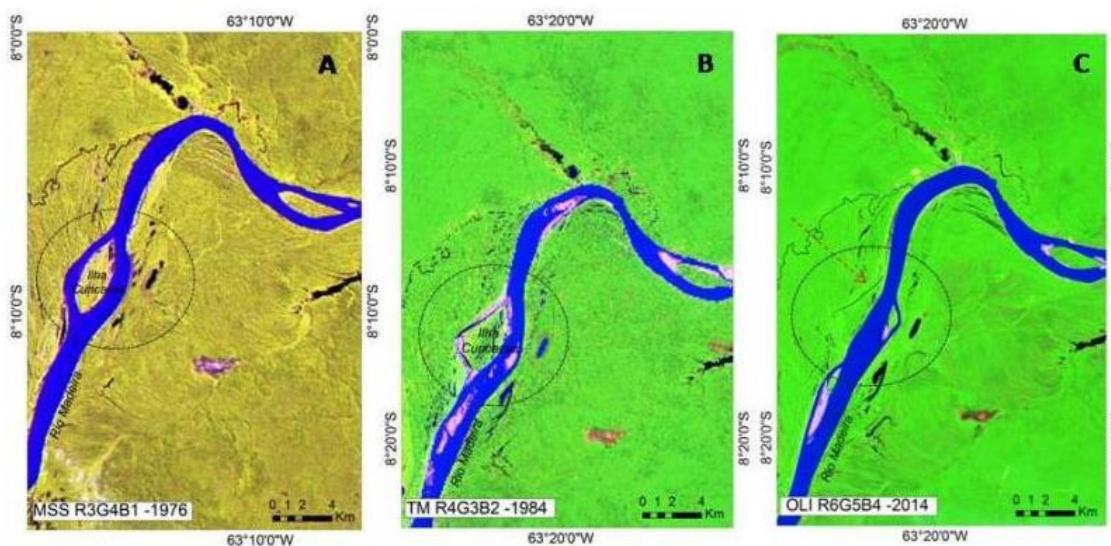


Com base em todo os exercícios realizados durante essa primeira etapa do projeto de iniciação científica, foi possível ter conhecimento dos processos de delimitação de bacias hidrográficas, trabalhar com programas específicos para geoprocessamento, entender melhor como funcionam os programas e compreender o porquê de cada resultado, como por exemplo as diferenças nas abordagens usadas acima. Isso tudo foi muito importante para os próximos passos.

## 4.2. Análise de meandros

Em seguida, foi realizado um estudo sobre a dinâmica de drenagem no Rio Madeira e o desaparecimento da Ilha de Curicacas (RO), que aconteceu em menos de quatro décadas. Tal análise se mostra relevante dentro da perspectiva estocástica, por ser um caso visualmente muito expressivo, de linha cronológica relativamente curta, com a capacidade de enriquecimento para a pesquisa dentro do assunto, e além disso por ser um caso emblemático com um grande potencial de estudo.

A Figura 11 mostra como se deu o desaparecimento da Ilha de Curicacas, de 1976 até por fim em 2014.



**Figura 11.** Desaparecimento da Ilha de Curicacas, visível por satélite em 1976 e em 2014 apenas um canal abandonado. **Fonte:** Fontenele Sampaio, et al. (Universidade Federal de Rondônia)

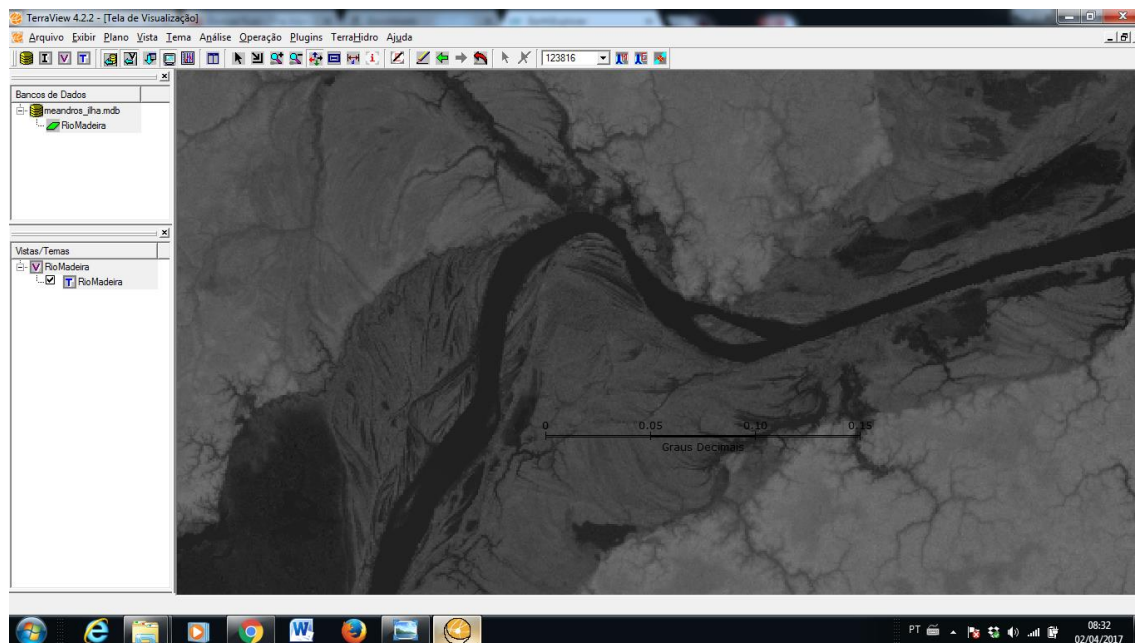
Com a imagem, é possível observar o desaparecimento progressivo com base na dinâmica de drenagem do Rio Madeira, criando um evento de grande representatividade ao mover-se e criar um canal abandonado, por um lado, e por outro o surgimento de um novo canal e o início do surgimento de outra Ilha.

A partir desse evento, foram realizados experimentos utilizando o *TerraViewHidro* com modelos digitais de elevação retirados do Earth Explorer. Para tanto, tem-se a área de estudo utilizada, representada pela Figura 12.



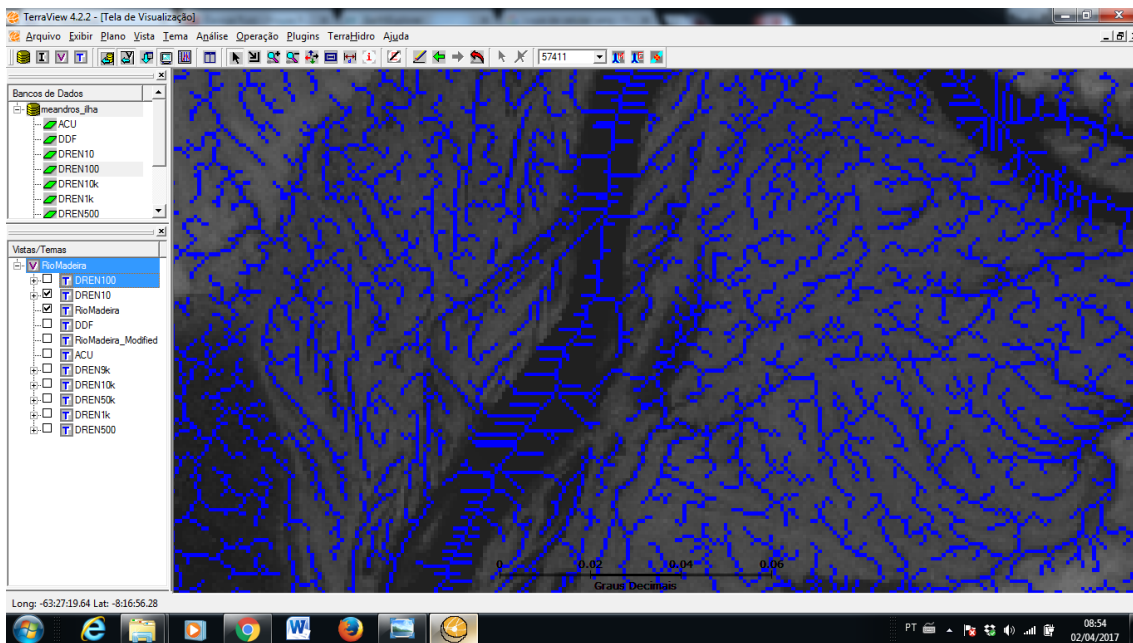
**Figura 12.** Área de estudo delimitada.

Em seguida, foi criado um banco de dados e importado o Modelo Digital de Elevação da região em questão, de acordo com a Figura 13.



**Figura 13.** Modelo Digital de Elevação dentro do *TerraViewHidro*.

Utilizando as ferramentas hidrológicas foram realizadas as extrações de Direção de Fluxo, Área de Contribuição e extração de Drenagem, assim como já foi explanado anteriormente. A Figura 14 representa a extração de Drenagem da região, utilizando um limiar equivalente a 100.



**Figura 14.** Extração de Drenagem, limiar de drenagem 100.

A partir da análise da Figura 14, observa-se que a drenagem ao longo da calha do rio apresenta um comportamento paralelo. Este paralelismo constatado é inexistente nas redes de drenagem reais, e comum aos algoritmos de escoamento determinísticos, o que reforça e motiva a utilização da abordagem estocástica.

## 5. Conclusões

Em abril de 2017 houve substituição do bolsista Patrick Vasconcellos Rodrigues da Silva pela bolsista Maria Carolina Barbosa Jurema, que finalizou as propostas do projeto e ideias desenvolvidas ao longo do estudo sobre redes hidrográficas.

Nesta nova fase do projeto, após a substituição, com o intuito de explorar a região que envolve os leitos adjacentes principais do rio Paraíba do Sul, em São José dos Campos, fez-se um estudo voltado à delimitação de bacias dos principais rios da cidade. Para tanto, utilizou-se o software *TerraViewHidro*, em que foi necessário realizar novamente um treinamento inicial com as ferramentas hidrológicas oferecidas por este programa, com a nova bolsista.

Neste treinamento, exercitou-se a aplicação das ferramentas de extração de fluxo, área de contribuição, extração de drenagem e delimitação de bacias hidrográficas. O conhecimento teórico que envolve projeções cartográficas foi bastante importante nesta etapa para análises dos shapes e imagens de satélite no *TerraViewHidro*.

Após o treinamento, foi possível utilizar as práticas adquiridas com dados de interesse. Para tanto, tendo como base a bacia do rio Paraíba do Sul, extraiu-se a drenagem com limiar equivalente a 10.000 para a delimitação de sub bacias dos rios e córregos adjacentes.

Registra-se que este relatório foi escrito por ambos os bolsistas e os resultados das duas partes do projeto estão aqui dispostos, ressaltando tudo o que foi realizado inicialmente pelo primeiro bolsista e concluído pela bolsista em substituição.

## 6. Referências Bibliográficas

1. IBGE. **Extensão Territorial do Brasil**. Disponível em: <[http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/cartografia/default\\_territ\\_area.shtm](http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/cartografia/default_territ_area.shtm)> Acesso: Fevereiro 2017.
2. IBGE. **Senso Demográfico**, 2010. Disponível em <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/default.shtm>> Acesso: Fevereiro 2017.
3. IMF, **WEO (World Economic Outlook)**, 2016. Disponível em: <<http://www.imf.org/external/pubs/ft/weo/2016/02/>> Acesso: Fevereiro 2017.
4. CHRISTOFOLETTI, p. 163, 1981. **Geomorfologia Fluvial**. Editora Edgar Blücher LTDA.

## 7. Anexos

- **Participação em eventos, congressos, exposições, feiras e premiações:**

II IPTMU – Encontro sobre Impactos Potenciais de Desastres Naturais em Infraestruturas de Transportes e Mobilidade Urbana. Outubro 2016.

- **Publicação de artigo científico em periódico:**

SANTOS, L. B. L.; VASCONCELLOS, O.; MIRANDA, T. N. S., CARVALHO, S. V. (2017). Pontes conceituais entre matemática e redução de risco de desastres socioambientais - o conceito de bacia hidrográfica estocástica. Revista PerCursos, v.18, n.36, p.125-136.