onde Ψ_d é a função distância e limiarização é o operador de limiarização, ambos definidos no capítulo 2, e a e b são valores estipulados de acordo com a característica em questão.

e) Os conjuntos nebulosos $\widetilde{aproximadamente_entre_a_e_b}$ são LUTs de operadores de limiarização, definidos por: $\mu_{\widetilde{[a,b]}} : \{0, ..., 255\} \longrightarrow \{0, 255\}$, tal que:

$$\mu_{\widetilde{[a,b]}}(s) = \begin{cases} 255, & \text{se } a \leq s \leq b \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} .$$

f) Os conjuntos nebulosos $\widetilde{erosão_de_XXX}$ são definidos por: $\mu_{\widetilde{erosão_de_XXX}} : E \longrightarrow \{0, 255\}$, tal que:

$$\mu_{\widetilde{erosão_de_XXX}}(x) = \begin{cases} 255, & \text{se } x \in \varepsilon(f_{XXX})(x) \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} ,$$

onde ε é o operador de erosão definido no capítulo 2.

g) O conjunto nebuloso $\widetilde{não_ponto_isolado}$ é definido por: $\mu_{\widetilde{não_ponto_isolado}} : E \longrightarrow \{0, 255\}$, tal que:

$$\mu_{\widetilde{não_ponto_isolado}}(x) = \begin{cases} 255, & \text{se } x \in \lambda_\bullet(f_{XXX})(x) \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} ,$$

onde $\lambda_\bullet$ é o operador sup-gerador definido no capítulo 2.

A Classe Rio

Conforme a breve definição dada sobre a classe Rio (que também é um atributo) e utilizando-se as bandas adequadas que realcem a presença de água na imagem, a regra para a extração do Rio é:

R_1 : *SE radiometria na banda* 4 = $\widetilde{aproximadamente_entre}$_0_e_13
E radiometria na banda 5 = $\widetilde{aproximadamente_entre}$_0_e_10
ENTÃO posição $\in \widetilde{b_{rio}}$

A Figura 5.6 mostra a implementação da regra R_1. As bandas 4 e 5 são as mais convenientes para esse tipo de extração, visto o realce que dão às lâminas d'água. Por isso, não importando a sua localização na imagem, é possível extraí-lo apenas pela sua radiometria. Da limiarização da imagem para cada banda resultam imagens binárias cujo ínfimo é uma imagem binária representando a classe Rio.

A regra R_1 dá a forma de obtenção do Rio Tapajós na imagem, mas não o relaciona ao universo das classes C. Para fazer isso, uma regra adicional R_{1a} relaciona o conjunto nebuloso $\widetilde{c_{rio}}$ com o conjunto nebuloso $\widetilde{b_{rio}}$ obtido anteriormente.

R_{1a} : *SE posição* $\in \widetilde{b_{rio}}$
ENTÃO classe $= \widetilde{c_{rio}}$

onde $\widetilde{c_{rio}}$ é um conjunto nebuloso de C. Como visto na regra R_3 do capítulo anterior, essa regra não é explicitada em uma "workspace" própria.

O Atributo Margem Direita do Rio As margens do Rio são as porções de terra muito próximas ao próprio Rio. Porém nesse caso, o interesse recai sobre uma das margens especificamente e por isso necessita-se de algo que a caracterize. Então as regras são:

R_2 : *SE posição* $\in \widetilde{muito_perto_do_rio}$
E classe $\in \neg\widetilde{b_{rio}}$
ENTÃO posição $\in b_{\widetilde{margem_do_rio}}$

R_3 : *SE posição* $\in \widetilde{componente_conexa_1}$
ENTÃO posição $\in b_{\widetilde{lado_leste_do_rio}}$

onde: $\widetilde{componente_conexa_1}$ denota o conjunto nebuloso dado pela descrição "componente conexa de "não" rio marcada pelo lado leste da imagem".

R_4 : *SE posição* $\in b_{\widetilde{margem_do_rio}}$
E posição $\in b_{\widetilde{lado_leste_do_rio}}$
ENTÃO posição $\in b_{\widetilde{margem_direita_do_rio}}$

Extrair as margens do Rio e, em especial, uma das margens do Rio, é uma tarefa mais complexa. A Figura 5.7 ilustra a obtenção do atributo Direita do Rio que é necessário para essa operação de extração e será útil em outras ocasiões. Nota-se pela Figura 5.8 que se torna necessário um conjunto maior de operadores ou "caixinhas" para executar a tarefa.

Nota-se também que nas regras aparecem operadores da Morfologia Matemática que viabilizam o processo. No caso, a Abertura por Reconstrução é um operador cuja função é reconstruir todo o lado direito do Rio a partir do marcador lado leste da imagem, ou seja, a Abertura por Reconstrução reconstroi todo um conjunto a partir de um subconjunto utilizado como marcador (Banon e Barrera, 1994).

Pelas Figuras 5.7 e 5.8, percebe-se que a implementação é uma tradução literal das regras expostas acima. A regra R_2 é construída a partir das "caixinhas" situadas na parte de cima da Figura 5.8, onde a subtração retira o Rio isolando a

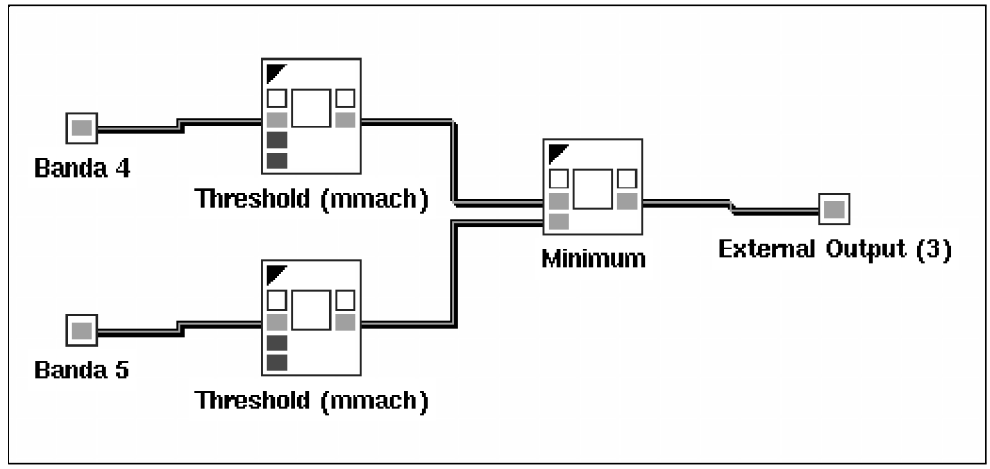

Fig. 5.6: "Workspace " que extrai o atributo Rio da imagem.

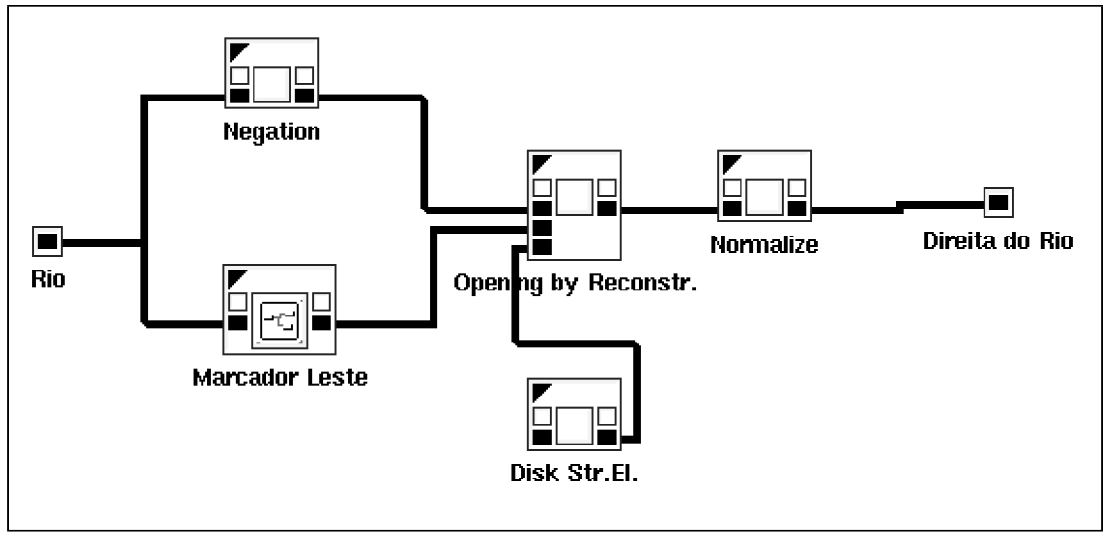

Fig. 5.7: "Workspace" que obtém a componente Direita do Rio.

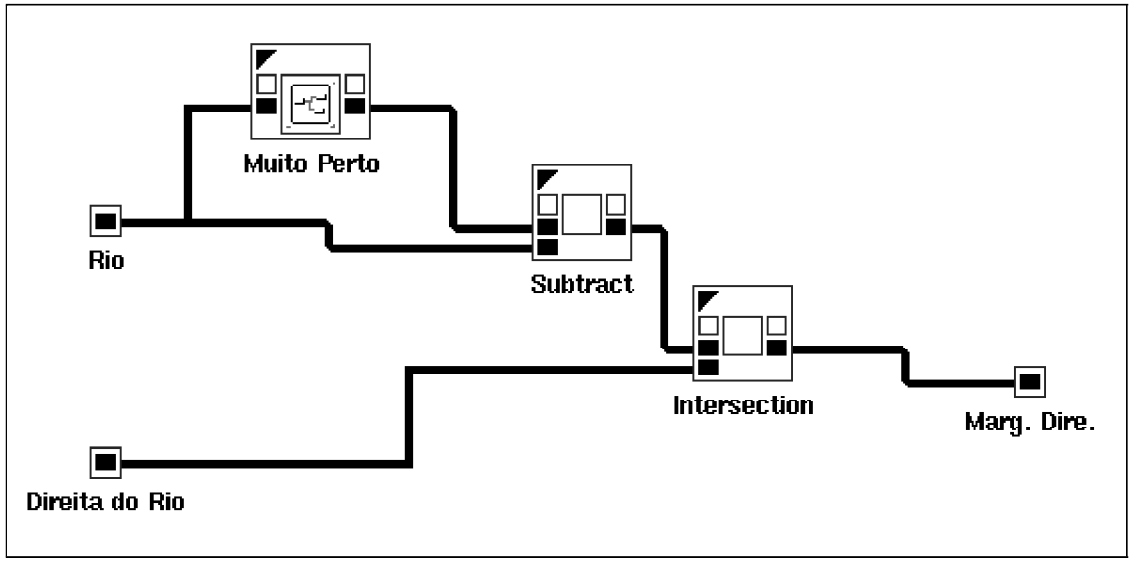

Fig. 5.8: "Workspace" que extrai o atributo Margem Direita do Rio.

característica Margens do Rio. Na regra R_3, ilustrada na Figura 5.7, a negação do Rio resulta em uma imagem sem a presença do Rio. A "caixinha" Marcador Leste extrai o lado leste da moldura ("frame") da imagem de entrada. O marcador será utilizado na Abertura por Reconstrução, tendo como entrada a negação do Rio. O resultado é uma imagem binária apontando toda a região à lado leste do Rio. A intersecção final (na Figura 5.8) representa a junção do resultado das regras R_2 e R_3 na regra R_4 e a imagem resultante é a Margem Direita do Rio.

A característica nebulosa Muito Perto é construída a partir da função distância da Morfologia Matemática. Sobre a função distância é aplicada uma limiarização, resultando na área da imagem com a característica Muito Perto (Figura 5.8). Essa limiarização da Morfologia Matemática corresponde a um corte de nível α dos Conjuntos Nebulosos.

A Classe Área Antropizada

Conforme a breve definição dada anteriormente, a classe Área Antropizada é caracterizada pelas áreas mais claras da imagem. Utilizando-se as bandas adequadas que realcem essa característica, processa-se sua extração, através da regra:

R_5 : *SE posição* $\in \widetilde{b_{lado_direito_do_rio}}$ *OU posição* $\in \widetilde{b_{lado_esquerdo_do_rio}}$
E posição $\in \widetilde{componente_conexa_2}$
OU posição $\in \widetilde{componente_conexa_3}$
OU posição $\in \widetilde{componente_conexa_4}$
ENTÃO posição $\in \widetilde{b_{área_antropizada}}$

onde: $\widetilde{componente_conexa_2}$ denota o conjunto nebuloso dado pela descrição "conjunto das posições dos "pixels" com radiometria aproximada entre 27 e 70 na banda 3, que não são pontos isolados"; $\widetilde{componente_conexa_3}$ denota o conjunto nebuloso dado pela descrição "componente conexa do conjunto das posições dos "pixels" não isolados com radiometria aproximada de no mínimo por volta de 70 na banda 5, que contém pelo menos uma área quadrada de 270 m^2" e $\widetilde{componente_conexa_4}$ denota o conjunto nebuloso dado pela descrição "componente conexa do conjunto das posições dos "pixels" não isolados com radiometria aproximada entre 16 e 60 na banda 7, que contém pelo menos uma área quadrada de 270 m^2"

A Figura 5.9 mostra como extrair o atributo Área Antropizada da imagem. As bandas 3 e 7 são as melhores para esse tipo de extração; a banda 5 atua como auxiliar. Novamente, a localização do atributo na imagem não é importante e é possível extraí-lo apenas pela sua radiometria. A limiarização da imagem para cada banda resulta em imagens binárias. O operador Afinamento na seqüência visa eliminar pontos isolados e é um sup-gerador (intersecção de uma erosão binária pelo elemento estruturante pontual centrado na origem e uma anti-dilatação binária pelo quadrado estruturante 3x3 a menos de seu ponto central). A seqüência de operações erosão e reconstrução nas bandas 5 e 7 visam eliminar as componentes de pontos com área quadrada inferior a 270m^2 e reconstruir as componentes conexas, cuja conexidade seja maior ou igual a um disco de diâmetro 2.

O supremo de todas as imagens em ambos os lados do Rio produz uma imagem com o atributo Área Antropizada.

Para a classe área antropizada, a regra adicional R_{5a} dá a relação:

R_{5a} : *SE posição* $\in \widetilde{b_{área_antropizada}}$
ENTÃO classe $= \widetilde{c_{área_antropizada}}$

onde $\widetilde{c_{área_antropizada}}$ é um conjunto nebuloso de C. Analogamente a regra R_{1a} essa regra não é explicitada em uma "workspace" própria.

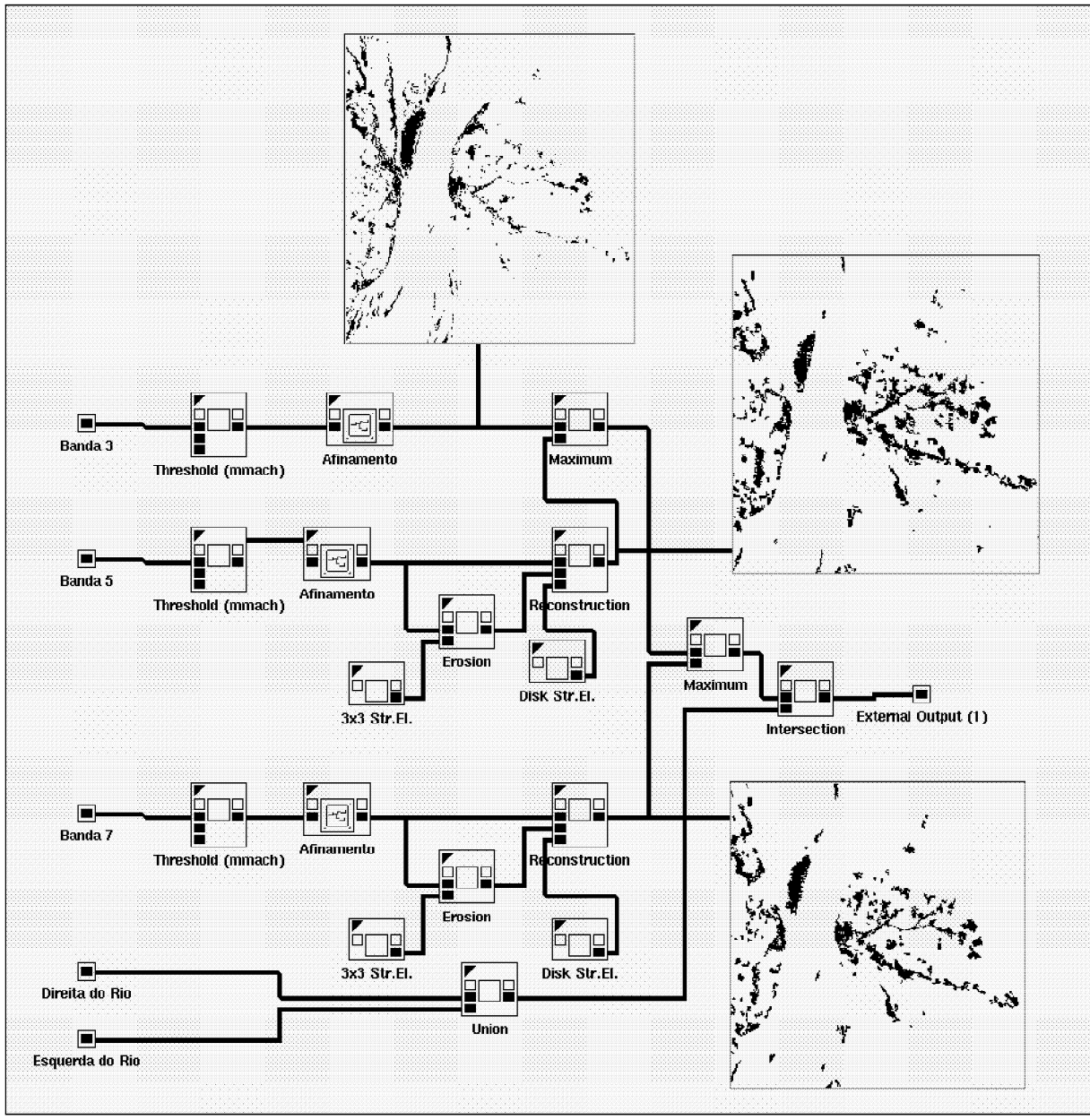

Fig. 5.9: "Workspace" que extrai o atributo Área Antropizada.

A Classe Área Urbana da Cidade de Aveiro Pela descrição, a cidade de Aveiro se encontra dentro da Área Antropizada. Por isso, utilizando-se uma limiarização mais restrita pode-se obtê-la, ainda que apenas isso não baste. Uma outra informação importante é que é possível visualizar os cruzamentos das ruas da cidade. As regras são:

R_6 : *SE posição* $\in b_{\widetilde{área_antropizada}}$
E radiometria_na_banda_3 $=$ *aproximadamente_entre_37_e_70*
E radiometria_na_banda_7 $=$ *aproximadamente_entre_22_e_60*
E posição $\in b_{\widetilde{margem_direita_do_rio}}$
ENTÃO posição $\in b_{\widetilde{possíveis_áreas_de_cidade}}$
R_7 : *SE posição* $\in$ *componente_conexa_5*
ENTÃO classe $=$ *área_urbana_da_cidade_de_Aveiro*

onde: *componente_conexa_5* denota o conjunto nebuloso dado pela descrição "componente conexa do conjunto das posições dos "pixels" que denotam "possívies áreas de cidade" marcado pela erosão das $b_{possíveis_áreas_de_cidade}$ pela cruz.

Conforme pode ser visto na Figura 5.10, a implementação é praticamente uma tradução da própria regra. Faz-se uma limiarização da banda 3 e 7, em uma faixa de níveis de cinza mais estreita que a da Área Antropizada. O mínimo dessa imagem com a imagem da Margem direita do Rio resulta em uma imagem que contém a área da cidade e outras componentes. Essas áreas são classificadas como "possíveis áreas de cidade". O marcador para a reconstrução leva em consideração os cruzamentos das ruas do centro da cidade, onde a cruz é um elemento presente. Aparece, portanto, a Erosão na regra como uma forma de apontar onde a forma de cruz aparece na imagem. O afinamento elimina ruídos da imagem e segue-se a abertura por reconstrução por um disco estruturante de diâmetro 6. O fechamento a seguir delimita a área urbana da Cidade de Aveiro.

A Classe Floresta Ombrófila Densa

A Floresta Ombrófila Densa é uma área caracterizada pela presença da Drenagem Densa. Essa classe em especial tem alguma diferença em relação às demais classes: somente a caracterização pela drenagem não é suficiente para que o resultado final seja considerado satisfatório. Por esse motivo, além da drenagem, usou-se uma segmentação e a intervenção do usuário para informar ao sistema quais são as componentes conexas que correspondem a Floresta Ombrófila Densa (Figura 5.11).

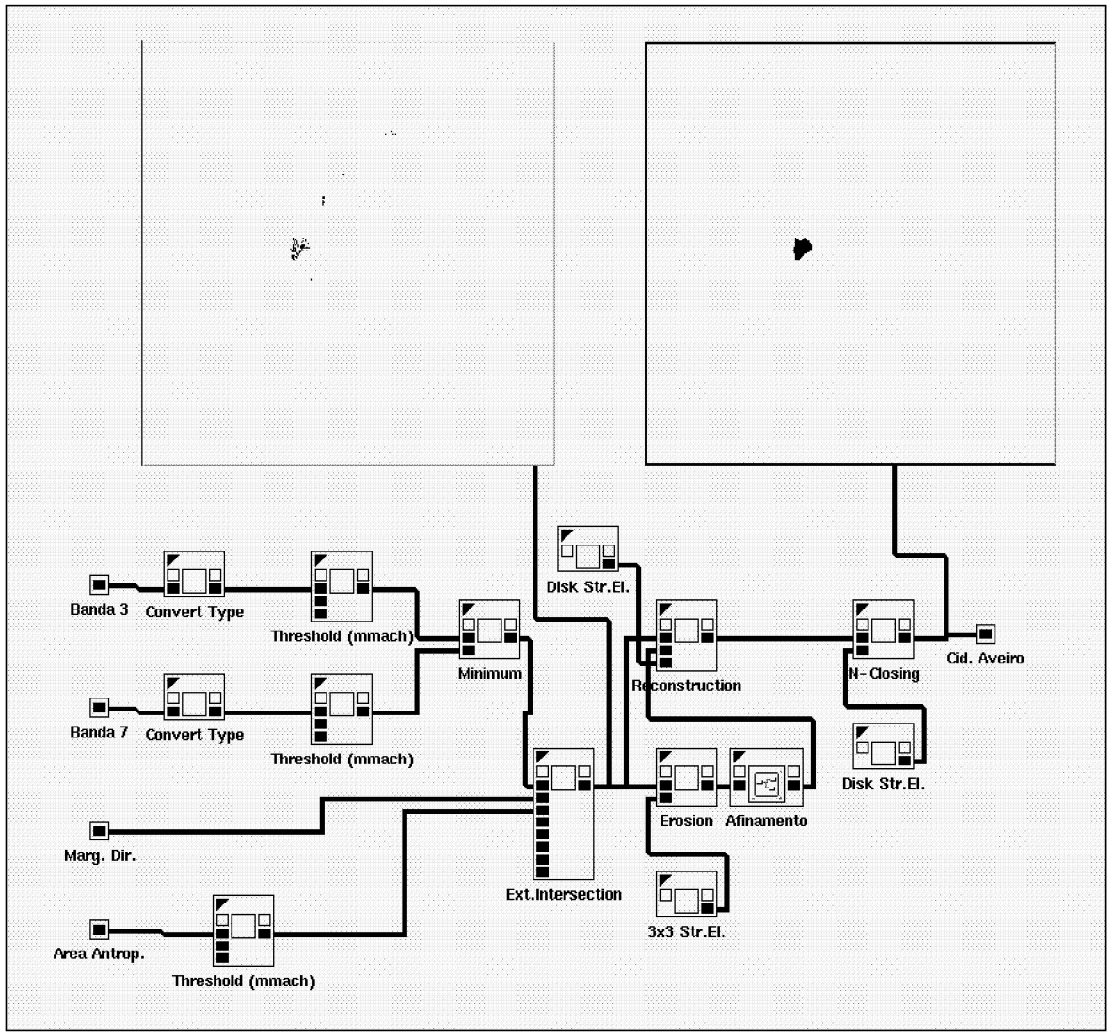

Fig. 5.10: "Workspace" que extrai o atributo Cidade de Aveiro.

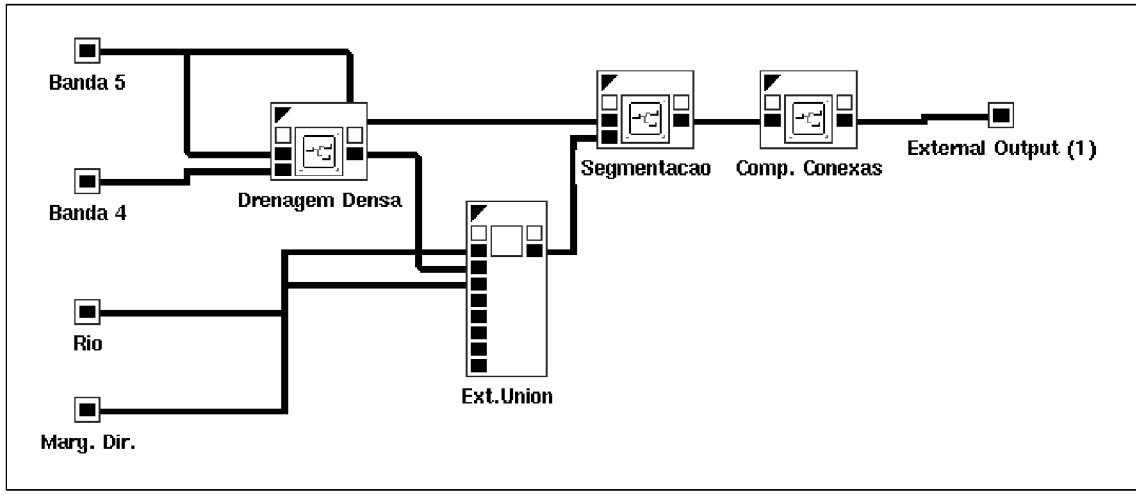

Fig. 5.11: "Workspace" que extrai o sub-atributo Floresta Ombrófila Densa.

O Atributo Drenagem Densa O atributo Drenagem Densa (Textura) é uma das características da classe Floresta Ombrófila Densa que está caracterizada também pela sua distância do Rio e da cidade de Aveiro, na direção leste. As regras são:

R_8 : *SE posição* $\in$ $\widetilde{componente_conexa_6}$
ENTÃO posição $\in b_{não_longe_da_área_antropizada}$

onde: $\widetilde{componente_conexa_6}$ denota o conjunto nebuloso dado pela descrição "componente conexa do conjunto das posições dos "pixels" com radiometria aproximada entre 23 e 30 na banda 5, marcado pela área antropizada" e $b_{não_longe_da_área_antropizada}$ denota o conjunto nebuloso "não muito longe da área antropizada à leste do rio".

R_9 : *SE posição* $\in$ $\widetilde{na_região_de_(longe_do_rio}$ E $b_{não_longe_da_área_antropizada})$
E posição $\in$ $\widetilde{não_ponto_isolado}$
ENTÃO posição $\in b_{marcador_para_textura}$

onde: $\widetilde{na_região_de}$ $(\widetilde{longe_do_rio}$ E $b_{não_longe_da_área_antropizada})$ denota o conjunto nebuloso dado pela descrição "na região das áreas 'longe do rio ' e 'não muito longe da área antropizada à leste do rio' " e $\widetilde{não_ponto_isolado}$ denota a filtragem por afinamento.

A seqüência de limiarizações é necessária para uma melhor obtenção da informação. As bandas 4 e 5 são boas para o trabalho sobre drenagem. As limiarizações na banda 5, visam obter uma imagem binária com o atributo Textura para posterior Reconstrução (Figura 5.12). O seu marcador parte de uma imagem binária filtrada por Afinamento e utilizando-se a característica: está localizada Não Muito Longe da Área Antropizada, na direção Leste. Pode-se notar a presença de uma caracterização nebulosa sobre esse atributo: Não Muito Longe. A função nebulosa que delimita essa condição é dependente da escala da imagem e tem como resultado uma imagem binária para se constituir um marcador para a reconstrução. Essa abertura por reconstrução por um disco planar de diâmetro 22 isola o atributo Textura, porém ainda não de forma satisfatória. Para resolver esse problema, utiliza-se da informação adicional: ela está Longe do Rio. Porém, aqui sua conotação é de melhorar a imagem reconstruída visando aprimorar o marcador que será usado na segmentação posteriormente, pela intersecção das duas imagens. Novamente, um Afinamento é aplicado para filtragem.

A "caixinha" "Proxim. Drenag." faz o papel da expressão "na região de" e se trata de uma função dependente da escala da imagem e tem como resultado uma imagem binária. Em seguida, aplica-se o operador "Close Holes" (por um quadrado estruturante 3x3) que melhora definitivamente a qualidade do marcador. Por fim, obtém-se um marcador para a Textura que tem como conotação: nas proximidades da área de Drenagem.

A Segmentação e Componentes Conexas Como o que foi obtido foi um marcador para a área da Floresta Ombrófila Densa através da Drenagem Densa e não a classe propriamente, pode-se lançar mão de uma segmentação para obter essa classe. A segmentação tem duas imagens de entrada: uma das entradas para a segmentação é a imagem de uma das bandas (no caso a banda 5) e a outra é a união dos marcadores que são os originados pelas regras que definem o Rio, a Margem Direita do Rio e a Drenagem Densa (Figura 5.13). Vale salientar que a segmentação não é um processo que tenha uma regra como equivalente, contida no sistema especialista. Porém, contém em seu bojo um conhecimento morfológico.

A segmentação ajuda a dar uma forma final a classe Floresta Ombrófila Densa. Porém, para apontá-la, lança-se mão de um outro conceito da Morfologia: o de Componentes Conexas.

A "caixinha" Componentes Conexas é o decisor que vai selecionar a classe Floresta Ombrófila Densa, em sua forma final. Nesse ponto, a intervenção do usuário é decisiva, apontando as "componentes conexas" que realmente constituem a classe, após a rotulação ("Labeling") - Figura 5.14.