UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

DIEGO RAFAEL MORAES

Estimação de idade óssea: análise do polinômio que descreve o comportamento da concavidade inferior da terceira vértebra cervical como característica discriminante

São Carlos
2013

DIEGO RAFAEL MORAES

Estimação de idade óssea: análise do polinômio que descreve o comportamento da concavidade inferior da terceira vértebra cervical como característica discriminante

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento de Sinais e Instrumentação.

Orientador: Prof. Dr. Evandro Luis Linhari Rodrigues.

São Carlos
2013

Trata-se da versão corrigida da dissertação. A versão original se encontra disponível na EESC/USP que aloja o Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica.

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Moraes, Diego Rafael
M827e Estimação de idade óssea : análise do polinômio que descreve o comportamento da concavidade inferior da terceira vértebra cervical como característica discriminante / Diego Rafael Moraes; orientador Evandro Luis Linhari Rodrigues. São Carlos, 2013.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Área de Concentração em Processamento de Sinais e Instrumentação -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2013.

1. Idade óssea. 2. Vértebra cervical. 3. Processamento de imagens. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Bacharel **DIEGO RAFAEL MORAES.**

Título da dissertação: "Estimação de idade óssea: análise do polinômio que descreve o comportamento da concavidade inferior da terceira vértebra cervical como característica discriminante".

Data da defesa: 28/02/2013

Comissão Julgadora:	**Resultado:**
Prof. Associado **Evandro Luis Linhari Rodrigues (Orientador)** (Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)	APROVADO.
Prof. Dr. **Celso Olivete Júnior** (Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP - Presidente Prudente)	APROVADO
Prof. Dr. **Jean-Jacques Georges Soares de Groote** (Faculdades COC)	Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

Dedico este trabalho aos meus pais, Lúcio e Vera, por toda educação e conselhos na formação do meu caráter, assim como ao meu amor Janaína, pelo apoio, incentivo e compreensão ao longo deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Evandro Luis Linhari Rodrigues, meu orientador, por toda atenção e dedicação neste projeto de pesquisa científica.

Aos membros da banca de qualificação/defesa, Profs. Drs.: Adilson Gonzaga, Celso Olivete Júnior e Jean-Jacques Georges Soares De Groote; pela participação e dedicação nas sugestões de correções deste trabalho.

Ao corpo docente que ministrou as minhas disciplinas, Profs. Drs.: Adilson Gonzaga, Ivan Nunes da Silva e Marcelo Andrade da Costa Vieira; pelos conhecimentos e conselhos acadêmicos, que somados resultaram no profissional que sou.

Aos funcionários da USP de São Carlos, sempre atenciosos e dispostos a ajudar em qualquer tipo de problema, em especial à Jussara Ramos Zoia, Marisa Helena R. Vicente Fortulan, Leonardo Erivelto Soares de Oliveira e Daniel Rogério Manjini.

Ao Prof. Dr. Ary dos Santos Pinto assim como sua orientada MSc. Renata Gonçalves, ambos da Faculdade de Odontologia de Araraquara da UNESP, pela disponibilização da base de dados de imagens radiográficas.

Ao Prof. Dr. Francisco Haiter Neto assim como sua orientada Dr. Maria de Paula Caldas, ambos da Faculdade de Odontologia de Piracicaba da UNICAMP, pela disponibilização da base de dados de imagens radiográficas.

À CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo auxílio financeiro concedido em parte do período da realização deste trabalho.

Por último, mas não menos importantes, a todos os meus amigos e colegas pessoais, profissionais e da pós-graduação, que sempre estiveram disponíveis a me ajudar em qualquer tipo de problema, os quais sabem que não é necessário listar os seus nomes aqui, porque verdadeiramente conhecem a sua importância para mim.

RESUMO

MORAES, D. R. **Estimação de idade óssea: análise do polinômio que descreve o comportamento da concavidade inferior da terceira vértebra cervical como característica discriminante**. 2013. 104 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

A idade óssea é uma informação importante para o diagnóstico de anomalias ósseas e identificação dos estágios de desenvolvimento na pediatria, endocrinologia e ortodontia, assim como na estimação de idade na área forense. A idade óssea é obtida pela análise de qualquer osso ou conjunto de ossos por meio de radiografias da região de interesse. Este trabalho apresenta uma metodologia composta por duas fases. A primeira fase trata do processamento de imagem, responsável pela segmentação e extração de características de telerradiografias em norma lateral. A segunda fase é responsável pela estimação da idade óssea, que propõe um estudo para correlacionar o polinômio extraído da concavidade inferior da terceira vértebra com a idade óssea por meio de redes neurais artificiais. Para a média dos resultados da primeira fase, os valores encontrados foram 82,39% de precisão, 91,70% de exatidão e 8,30% de erro. Baseado nestes resultados concluiu-se que a metodologia é eficaz para a segmentação dos ossos das cervicais, entretanto como algumas estruturas não devem ser consideradas, a segmentação foi influenciada pela contribuição dos falsos positivos, que nas imagens analisadas são segmentos de ossos da parte posterior das cervicais. Em contrapartida, para a segunda fase os resultados validaram o uso do polinômio em métodos de estimação, que pode ser utilizado de forma direta (coeficientes do polinômio) ou indireta (área e máxima altura da concavidade), comprovando que ele contribui no aumento da correlação quando utilizado em conjunto com outras características. Para ambos os gêneros a correlação atingiu valores em torno de 0,97, com erro médio absoluto de 0,4 anos e sem diferenças estatisticamente significativas pelo *T-Student* com nível de significância de 5%. Portanto concluiu-se que a metodologia apresenta resultados expressivos, respeitando a tolerância dos métodos clássicos.

Palavras-chave: Idade óssea, vértebra cervical, processamento de imagens.

ABSTRACT

MORAES, D. R. **Bone age estimation: analysis of the polynomial that describes the bottom concavity behavior of the third cervical vertebra as discriminant characteristic**. 2013. 104 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

Bone age is important information for the diagnosis of bone anomalies and identification of developmental stages in pediatrics, endocrinology and orthodontics as well in the age estimation in the forensic field. Bone age is obtained by analysis of any bone or group of bones through of radiographs the region of interest. This paper presents a methodology that consists of two phases. The first phase deals with image processing, responsible for segmentation and feature extraction of lateral cephalograms. The second phase is responsible for bone age estimation, which proposes a study to correlate the polynomial extracted from bottom concavity of the third vertebra with bone age using artificial neural networks. The average of first phase results was 82.39% of precision, 91.70% of accuracy and 8.30% of error. Based on these results it was concluded that the method is effective for the segmentation of the cervical bone, however, since some structures should not be considered, the segmentation was influenced by the contribution of false positives, that in the images analyzed are bone's segments from the back of the cervical. In contrast, for the second phase the results validated the use of polynomial in estimation methods that can be used directly (polynomial coefficients) or indirect (area and maximum height of concavity), proving that it contributes in increasing the correlation when used together with other features. For both genders the correlation reached values around 0.97, with a mean absolute error of 0.4 years and no statistically significant differences by *T-Student* with a significance level of 5%. Therefore it was concluded that the methodology shows significant results, respecting the tolerance of the classical methods.

Keywords: bone age, cervical vertebra, image processing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Exemplo de radiografia carpal. 32
Figura 2.2: Centros de ossificação do método GP. 33
Figura 2.3: Exemplo de imagem do método TW. 34
Figura 2.4: Centros de ossificação do método ER. 35
Figura 2.5: Exemplo de telerradiografia em norma lateral com a identificação da ROI. 37
Figura 2.6: Estágios de maturação propostos por Lamparski (1972). 38
Figura 2.7: Estágios de maturação propostos por Hassel e Farman (1995). 40
Figura 2.8: Estágios propostos por Baccetti, Franchi e McNamara Jr. (2002) 41
Figura 2.9: Estágios propostos por Baccetti, Franchi e McNamara Jr. (2005) 43
Figura 2.10: Métricas utilizadas na equação de Mito, Sato e Mitani (2002) 44
Figura 3.1: Distribuição de amostras longitudinais por faixa etária e gênero. 52
Figura 3.2: Distribuição de amostras transversais por faixa etária e gênero. 53
Figura 3.3: (a) imagem HSV; (b) imagem após equalização de histograma por região 54
Figura 3.4: (a) histograma com *threshold* pelo método de Otsu; (b) binarização 55
Figura 3.5: (a) processo de interpolação; (b) aplicação na imagem binarizada. 56
Figura 3.6: (a) remoção de ruídos; (b) preenchimento de buracos; (c) remoção de objetos pequenos. 57
Figura 3.7: Sequência dos processamentos computacionais. 58
Figura 3.8: Demonstração dos processos computacionais: 59
Figura 3.9: Representação da integral para identificar a área abaixo da curva 60
Figura 3.10: Representação da derivada para identificar a maior altura do polinômio. 61
Figura 3.11: Comportamento do polinômio médio para cada faixa etária (de 8 a 13,5 anos) do sexo feminino 62
Figura 3.12: Arquitetura PMC e topologias testadas. 63
Figura 4.1: Para imagem A: (a) original; (b) ideal; (c) segmentada; (d) analisada. 68
Figura 4.2: Para imagem B: (a) original; (b) ideal; (c) segmentada; (d) analisada 69
Figura 4.3: Para imagem C: (a) original; (b) ideal; (c) segmentada; (d) analisada. 70
Figura 4.4: Relação idade cronológica e área da concavidade para ambos os gêneros 72
Figura 4.5: Relação idade cronológica e maior altura da concavidade da C3 73
Figura 4.6: Relação entre idade cronológica e razão (AR/MA) para ambos os gêneros 73
Figura 4.7: Relação entre idade cronológica e medidas para o sexo masculino. 75
Figura 4.8: Relação entre idade cronológica e medidas para o sexo feminino 76
Figura 4.9: Relação entre idade cronológica e razão (AH3/AP3) 77
Figura 4.10: Correlação de Pearson das idades ósseas entre as médias dos laudos e o método proposto para o sexo masculino. 81
Figura 4.11: Correlação de Pearson das idades ósseas entre as médias dos laudos e o método proposto para o sexo feminino. 82
Figura 4.12: Diagrama de dispersão e regressão linear para o sexo masculino. 83
Figura 4.13: Diagrama de dispersão e regressão linear para o sexo feminino 83

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1: Valores de contingências e métricas encontrados para Figura 4.1d. 68
Tabela 4.2: Valores de contingências e métricas encontrados para Figura 4.2d. 69
Tabela 4.3: Valores de contingências e métricas encontrados para Figura 4.3d. 70
Tabela 4.4: Valores da média das métricas encontradas nas tabelas acima. 71
Tabela 4.5: Valor de r de cada característica e procedimento para cada gênero. 74
Tabela 4.6: Valor de r para combinação das características do polinômio.....74
Tabela 4.7: Valor de r de cada medida e procedimento para cada gênero. 76
Tabela 4.8: Valor de r para combinação das características e procedimento 77
Tabela 4.9: Valor de r_{max} do melhor treinamento de cada topologia para cada gênero. ...78
Tabela 4.10: Informações de treinamento referentes a melhor topologia. 79
Tabela 4.11: Parâmetros (média, desvio padrão, variância e *T-Student)* para a média dos laudos versus a metodologia proposta para cada gênero. 80
Tabela 4.12: Resultados de concordância do método proposto para cada gênero. 84
Tabela 4.13: Resultados do EMA para o método proposto para cada gênero. 84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AR	Área da concavidade da C3
AH3	Altura anterior da C3
AP3	Largura ântero-posterior da C3
C2	Segunda vértebra cervical
C3	Terceira vértebra cervical
C4	Quarta vértebra cervical
C5	Quinta vértebra cervical
C6	Sexta vértebra cervical
CP	Coeficientes do polinômio da concavidade da C3
DPI	Dots per inch (em português: pontos por polegadas)
ER	Eklof & Ringertz
EMA	Erro médio absoluto
ERM	Erro relativo médio
EMVC	Estágios de maturação das vértebras cervicais
EQM	Erro quadrático médio
GP	Greulich & Pyle
H3	Altura média da C3
MA	Maior altura da concavidade da C3
PMC	Perceptron multicamadas
PH	Altura posterior da C3
RLM	Regressão linear múltipla
RNA	Rede neural artificial
ROI	Região de interesse
r	Coeficiente de correlação [-1 1]
r_{max}	Maior valor de correlação
R^2	Coeficiente de determinação [0 1]
TW	Tanner & Whitehouse

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 23
   1.1. Objetivos 26
   1.2. Justificativas e contribuições do trabalho 26
   1.3. Organização do trabalho 27
   1.4. Publicações relacionadas 28
2. ESTIMAÇÃO DE IDADE ÓSSEA 31
   2.1. Métodos por radiografias carpais 31
   2.2. Métodos por telerradiografias em norma lateral 36
   2.3. Considerações finais 49
3. METODOLOGIA 51
   3.1. Aquisição de imagem 51
   3.2. Pré-processamento 54
   3.3. Segmentação 55
   3.4. Extração de características 57
   3.5. Estimação de idade óssea 61
   3.6. Análise dos dados 64
   3.7. Considerações finais 65
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES 67
   4.1. Processamento de imagem 67
   4.2. Estimação de idade óssea 72
   4.3. Considerações finais 85
5. CONCLUSÕES 87
   5.1. Processamento de imagem 87
   5.2. Estimação de idade óssea 88
   5.3. Contribuições 89
   5.4. Trabalhos futuros 90

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 93

APÊNDICE A – Análise de dados para o coeficiente do polinômio 99

APÊNDICE B – Resultados do treinamento da RNA com o CP 103

1. INTRODUÇÃO

Existem diversos conceitos referentes a idade, entretanto, de forma resumida são divididos em quatro categorias: cronológica, biológica, psicológica e social. A idade cronológica, tipo de idade mais utilizada no dia-a-dia, é calculada a partir da data de nascimento do indivíduo com o objetivo de expressar quanto tempo se passou para uma pessoa. A idade biológica é utilizada para identificar o crescimento e desenvolvimento do corpo e da mente de um indivíduo. A idade psicológica é determinada pela capacidade de aprendizagem, memória, inteligência e emocional. A idade social é avaliada pelo comportamento de um indivíduo em relação as pessoas de sua idade numa determinada sociedade ou cultura.

Existem diversos indicadores que podem ser utilizados para determinar o estágio de desenvolvimento e maturação de um indivíduo, tais como: idade cronológica, óssea e dentária; variações de altura, peso e características sexuais secundárias. Entretanto, alguns indicadores são considerados pouco eficazes devido as diversidades em parâmetros de raça, enfermidade, genética e condição climática, socioeconômica e nutricional (FISHMAN, 1982; LOULY, 2010; OLIVETE, 2005).

A idade óssea é um dos indicadores mais utilizados para verificar o estado da maturidade esquelética de um indivíduo, sendo o registro mais fiel para representar a idade biológica, a qual nem sempre corresponde a idade cronológica, esta última baseada apenas na data do nascimento (LOULY, 2010; QUEIROZ, 2006).

A idade óssea assim como a maturação óssea das vértebras cervicais são assuntos cada vez mais estudados por profissionais da área da saúde, com o objetivo de buscar meios alternativos para a avaliação do crescimento e desenvolvimento de indivíduos. Esta informação é importante para o diagnóstico de anomalias ósseas e identificação dos estágios de desenvolvimento na pediatria, endocrinologia e ortodontia, assim como na estimação de idade na área forense (PLASSCHAERT, 2005).

A estimativa da idade óssea pode ser realizada pela análise de qualquer osso ou conjunto de ossos de um indivíduo por meio de radiografias da região de interesse (ROI), como por exemplo: ombro, joelho, tornozelo, quadril, cotovelo, pé, mão e vértebras cervicais. Isto é possível pois o crescimento e desenvolvimento das

partes do corpo humano de um indivíduo sadio ocorre em harmonia (GREULICH; PYLE, 1959; OLIVETE, 2005; RAYMUNDO, 2009).

Existem duas ROI tradicionais para se estimar a idade óssea, por meio de radiografias carpais (mão e punho) e por meio de telerradiografias em norma lateral (cervicais). Na literatura são encontrados com maior frequência os métodos que utilizam radiografias carpais. Segundo vários autores, incluindo-se Delorme (2010), o motivo é que a região da mão é de fácil acesso, possui muitos centros de ossificação e, como não contém órgãos vitais, pode ser submetida com maior frequência às doses de radiação.

Para a estimação da idade óssea por meio de radiografias carpais existem três métodos clássicos. São eles:

- Greulich & Pyle (GP): desenvolvido baseado em crianças norte-americanas, faz comparações visuais de 28 pontos de ossificação carpal com padrões (radiografias seriadas) fornecidos por um atlas, *Atlas of Skeletal Maturation of the Hand* (GREULICH; PYLE, 1959);

- Tanner & Whitehouse (TW): desenvolvido com crianças britânicas, analisa 20 ossos carpais e atribui um escore específico para cada osso. O resultado da soma desses escores é comparado com os escores indicados em tabelas, que apresentam a idade cronológica e esquelética correspondente a tais escores (TANNER; WHITEHOUSE, 1959);

- Eklof & Ringertz (ER): desenvolvido com crianças suecas, baseia-se em medidas de comprimento e/ou largura de 10 centros de ossificação carpal, escolhidos por melhor apresentar os surtos de crescimento. Essas medidas são ponderadas para obter uma estimativa da idade óssea (EKLOF; RINGERTZ, 1967).

Os dois primeiros métodos, GP e TW, por se tratarem de análises visuais consomem muito tempo e são subjetivos para a estimação da idade óssea, além de requerer experiência do avaliador/examinador. O terceiro método, ER, apesar de parecer objetivo por utilizar dimensões métricas, também é considerado subjetivo devido a baixa qualidade das imagens, o que dificulta a localização dos pontos desejados utilizados para as medições.

Baseado nestas pesquisas outros trabalhos surgiram ao longo dos anos, visando simplificar, automatizar e aumentar a precisão de tais métodos. Merece destaque o método desenvolvido por Olivete (2005), que simplifica o método de ER para 5 ou apenas 3 centros de ossificação com boa precisão.

Por outro lado, em relação aos métodos de estimação de idade óssea por meio de telerradiografias em norma lateral, em 1972 Lamparski observou as mudanças morfológicas das vértebras cervicais, mais precisamente da segunda à sexta vértebra, descrevendo assim seis estágios de maturação, e relacionou seus estágios de crescimento com a idade óssea.

Este método também é considerado subjetivo para a estimação da idade óssea, pois baseia-se em análises visuais das alterações morfológicas das cervicais. Entretanto, a grande vantagem de se utilizar as vértebras cervicais é porque não implica numa exposição extra do indivíduo à radiação, tendo em vista que esta radiografia já faz parte da documentação em diversos tratamentos.

A partir deste trabalho, diversas pesquisas foram realizadas obtendo variações deste método, explorando outras características, anatomias e quantidades de ossificações analisadas. Merece destaque o método desenvolvido por Hassel e Farman (1995), que reduz a análise das cinco vértebras para apenas três, sendo elas da segunda à quarta vértebra, encontrando uma alta correlação entre o método de Lamparski (1972) e Fishman (1982). A escolha dessas vértebras foi baseada pelo fato das mesmas não serem cobertas pelo colar de proteção da tireoide no processo de aplicação do raio-X.

Segundo Olivete (2005), existe um grande desafio no uso de técnicas de Visão Computacional para o desenvolvimento de uma metodologia capaz de obter diagnósticos computadorizados, que estimem a idade óssea com resultados satisfatórios para a aplicação em grandes populações, com diferentes faixas etárias e contrastes.

Outro desafio é a baixa qualidade das imagens, afetadas pelo efeito *Heel*, que é a distribuição irregular de intensidade dos raios-X, que ocasiona uma iluminação não uniforme na imagem. Essas imagens possuem baixo contraste entre ossos, tecidos e músculos, além da sobreposição dos ossos, o que dificulta o processamento desse tipo de imagem (BEHIELS, 2002).

1.1. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal realizar um estudo do comportamento da concavidade do bordo inferior da terceira vértebra cervical (C3) ao ser correlacionado com a idade óssea. Após investigar tal comportamento, o mesmo será aproximado para um polinômio, informação esta nunca utilizada na literatura para estimação de idade óssea. A proposta é estabelecer uma nova metodologia para a estimação de idade óssea baseada em uma única característica (polinômio) de apenas uma vértebra (C3). Posteriormente serão testadas combinações de características já utilizadas na literatura juntamente com o polinômio, com o objetivo de identificar a influência do polinômio nos métodos.

1.2. Justificativas e contribuições do trabalho

A motivação deste trabalho é impulsionada pela busca de meios alternativos mais simples e com maior precisão para a avaliação do crescimento e desenvolvimento dos seres humanos. A idade óssea assim como a maturação óssea são informações muito importantes para o diagnóstico de anomalias ósseas, tratamentos odontológicos e na área forense. Partindo da premissa que a idade óssea nem sempre está correlacionada com a idade cronológica, ou seja, que o crescimento e desenvolvimento de alguns indivíduos podem estar atrasados ou adiantados em relação a sua idade cronológica, é motivador o desenvolvimento de metodologias computacionais que ofereçam avanços em relação as limitações dos métodos clássicos e atuais.

A vantagem de utilizar as cervicais como ROI é que esta radiografia já faz parte da documentação básica do paciente em tratamentos odontológicos, assim não se faz necessário a exposição do paciente a mais uma aplicação de raio-X em outra parte do corpo, conforme ocorre na análise carpal.

O motivo da escolha da C3 como único centro de ossificação para as análises, é que esta estrutura possui boa visualização nas telerradiografias quando comparada a C2, pois esta última é exibida com sobreposição de ossos, aumentando a subjetividade das análises. O outro motivo, considerado principal, é

que de acordo com a literatura as alterações morfológicas da C3 são iniciadas antes do que as da C4. A vantagem é o aumento na capacidade de predizer idades ósseas menores, tendo em vista as premissas de que a concavidade dos corpos vertebrais inicialmente encontram-se planos e a C3 inicia seu processo de maturação antes que a C4.

A principal contribuição deste trabalho é o descobrimento e validação de uma nova característica ainda não explorada na área de estimação de idade óssea. Trata-se do polinômio extraído da concavidade da C3, que pode ser utilizado de forma direta (coeficientes do polinômio) ou indireta (útil para calcular a área, máxima altura, entre outras características da concavidade) em métodos de estimação.

Este trabalho não contribui apenas com a automação do processo e sim permite extinguir ou minimizar a subjetividade das análises manuais ou semiautomáticas realizadas por seres humanos. Ao tornar o método automático, contribui-se com o aumento na precisão e velocidade das análises, permitindo assim a execução rápida e precisa de lotes ou base de dados de imagens.

1.3. Organização do trabalho

Este trabalho foi dividido em cinco capítulos, sendo que o primeiro apresentou uma introdução sobre os aspectos gerais do desenvolvimento e maturação esquelética, bem como uma breve descrição dos métodos clássicos para as duas principais ROI, carpal e cervical. Posteriormente foram apresentados os objetivos gerais e as principais justificativas e contribuições deste trabalho. Por fim apresenta a organização do trabalho e as publicações relacionadas ao mesmo.

O segundo capítulo apresenta uma revisão mais detalhada dos métodos utilizados para a estimação de idade óssea que sustentam este trabalho. Foi dividido em metodologias por radiografias carpais e telerradiografias em norma lateral. Para as radiografias carpais foram abordados os métodos clássicos e alguns outros considerados importantes como evolução dos clássicos. Para as telerradiografias em norma lateral os métodos foram mais detalhados por tratar-se do foco deste trabalho, apresentando desde a sua origem até o estado da arte.

O terceiro capítulo apresenta a metodologia desenvolvida em duas partes, inicialmente a que atua no processamento das imagens de telerradiografias, abordando as fases de aquisição de imagens, pré-processamento, segmentação e extração de características. Posteriormente é apresentada a metodologia proposta para a estimação de idade óssea.

No quarto capítulo os resultados da metodologia desenvolvida são apresentados e discutidos.

No quinto capítulo são apresentadas as conclusões da metodologia desenvolvida, assim como as contribuições e trabalhos futuros.

1.4. Publicações relacionadas

IV Workshop da Pós-Graduação (EESC/USP)

MORAES, D.R.; RODRIGUES, E.L.L. Metodologia para extração automática de características das vértebras cervicais em imagens radiológicas para a estimação de idade óssea. In: IV WORKSHOP DA PÓS-GRADUAÇÃO (EESC/USP), 2011, São Carlos. **Resumos...** São Carlos: EESC/USP, 2011.

VIII Workshop de Visão Computacional (INF/UFG)

MORAES, D.R. et al. Metodologia para segmentação de região de interesse visando a extração automática de características das vértebras cervicais para estimação de idade óssea. In: VIII WVC (WORKSHOP DE VISÃO COMPUTACIONAL), 2012, Goiânia. **Anais**... Goiânia: INF/UFG, 2012.

XXIII Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica (SBEB)

MORAES, D.R. et al. Estimação de idade óssea cervical: uso de polinômio para identificar o comportamento da concavidade da C3. In: XXIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA BIOMÉDICA, 2012, Porto de Galinhas. **Anais**... Porto de Galinhas: SBEB, 2012.

IV Workshop da Pós-Graduação (EESC/USP)

MORAES, D.R.; RODRIGUES, E.L.L. Estimação de idade óssea cervical: metodologia baseada em polinômio que representa o comportamento da concavidade das cervicais. In: V WORKSHOP DA PÓS-GRADUAÇÃO (EESC/USP), 2012, São Carlos. **Resumos...** São Carlos: EESC/USP, 2012.

4th IEEE Biosignals and Biorobotics Conference

MORAES, D.R.; CASATI, J.P.B.; RODRIGUES, E.L.L. Analysis of polynomial behavior of the C3 cervical concavity to bone age estimation using artificial neural networks. In: 4th IEEE BIOSIGNALS AND BIOROBOTICS CONFERENCE, 2013, Rio de Janeiro. **Anais**... Rio de Janeiro: BRC/ISSNIP, 2013.

2. ESTIMAÇÃO DE IDADE ÓSSEA

A idade óssea é um dos indicadores mais utilizados para verificar o estado da maturidade esquelética de um indivíduo para diagnósticos de crescimento humano, anomalias ósseas, tratamentos odontológicos e na área forense, permitindo ser determinada por diversas ROI. Existem duas ROI tradicionais para estimar a idade óssea, por meio de radiografias carpais (mão e punho) e por meio de telerradiografias em norma lateral (cervicais).

Os métodos por telerradiografias em norma lateral são utilizados com menor frequência quando comparado com os métodos por radiografia carpal, devido o fato de ainda não existir uma ferramenta automática, com boa precisão, difundida e divulgada pelos profissionais e especialistas da área. Entretanto, possui a vantagem da não exposição extra do indivíduo à radiação, pois esta radiografia já faz parte da documentação odontológica.

Abaixo serão apresentadas as origens e os principais métodos de estimação de idade óssea para as duas ROI, carpal e cervical, bem como os estudos e pesquisas recentes para ambas.

2.1. Métodos por radiografias carpais

Análises por radiografias carpais tem sido muito utilizadas para estimar a idade óssea de um indivíduo. Um exemplo deste tipo de imagem pode ser observado abaixo na Figura 2.1.

Figura 2.1: Exemplo de radiografia carpal.

Em 1929 estudos foram iniciados pela Western Reserve University School of Medicine in Ohio, que serviram de base para uma investigação a longo prazo, de 1931 até 1942, do crescimento e desenvolvimento humano por meio de radiografias do ombro, cotovelo, mão, quadril e joelho. Baseado em parte dos dados coletados nestes estudos, Todd (1937) publicou um atlas, *Atlas of Skeletal Maturation of the Hand (*NIEMEIJER, 2002).

Existem três métodos clássicos encontrados na literatura que além de serem utilizados na prática alavancaram diversas pesquisas, são eles GP, TW e ER, melhores descritos abaixo e acompanhados também de outros métodos considerados relevantes.

Greulich e Pyle (1959) publicaram seu atlas, *Radiographic Atlas of Skeletal Development of the Hand and Wrist*, baseado em parte do atlas de Todd (1937) e o restante obtido do estudo original. Posteriormente realizaram um estudo por meio de inspeções visuais das radiografias carpais de crianças norte-americanas, com as radiografias impressas no seu próprio atlas*,* onde um total de 28 centros de ossificação foram examinados, ilustrados pela Figura 2.2.

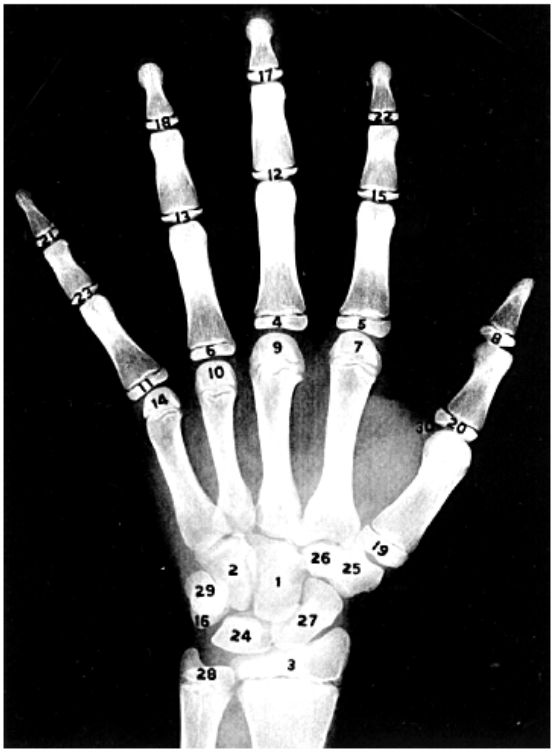


Figura 2.2: Centros de ossificação do método GP.
Fonte: Greulich e Pyle (1959).

Todos os centros são comparados com os padrões fornecidos pelo atlas até encontrar o padrão semelhante. Um dos problemas é que nem sempre a radiografia em análise coincide exatamente com algum padrão fornecido pelo atlas. Nestes casos, atribui-se ao que mais se aproxima.

Tanner e Whitehouse (1959) desenvolveram um método com crianças britânicas, porém, a inspeção foi realizada de forma individual (Figura 2.3), onde cada osso recebeu um escore referente ao seu estágio de desenvolvimento. No final da análise os escores são somados e comparados com os escores encontrados em uma tabela, que apresenta a idade esquelética equivalente a radiografia carpal analisada.

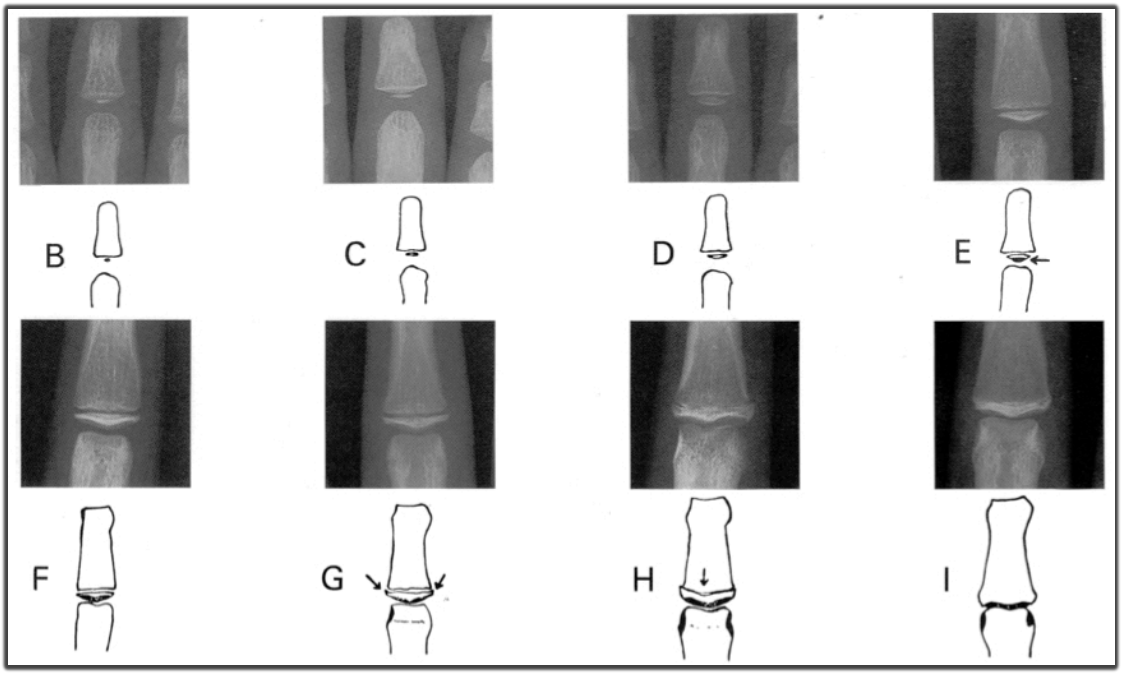


Figura 2.3: Exemplo de imagem do método TW.
Fonte: Niemeijer (2002, p.12).

Esta metodologia original passou por revisões pelos próprios autores, sendo encontrada na literatura como TW1 (TANNER; WHITEHOUSE; HEALY, 1962), TW2 (TANNER et al., 1975, 1983), TW3 (TANNER et al., 2001). Resumidamente, em 1962 o TW1 assim como o original analisava os 20 ossos da mão e punho.

Para o TW2, em 1975, os escores foram diferidos para cada sexo e o método foi divido em três variações, permitindo a exclusão de alguns ossos, são elas: (1) *TW-20* que analisa os mesmos 20 ossos do método original; (2) RUS que analisa 13 ossos, todos do TW-20 com exceção dos carpais; (3) CARPAL que analisa apenas os 7 ossos do carpo. Ainda para o TW2, porém em 1983, as equações de predição foram alteradas.

Por fim, em 2001, o TW3 além de extinguir o TW-20, alterou novamente as equações de predição de estatura na idade adulta.

Eklof e Ringertz (1967) realizaram um estudo com crianças suecas, baseado na medida de comprimento e/ou largura em milímetros de 10 centros de ossificação carpal. Este número foi resultado de testes de todos os ossos da mão e punho, e escolhidos apenas os que proporcionaram alto coeficiente de correlação (0,922 – 0,964) da idade óssea estimada em relação ao laudo médico. A Figura 2.4 mostra quais foram os centros de ossificação escolhidos.

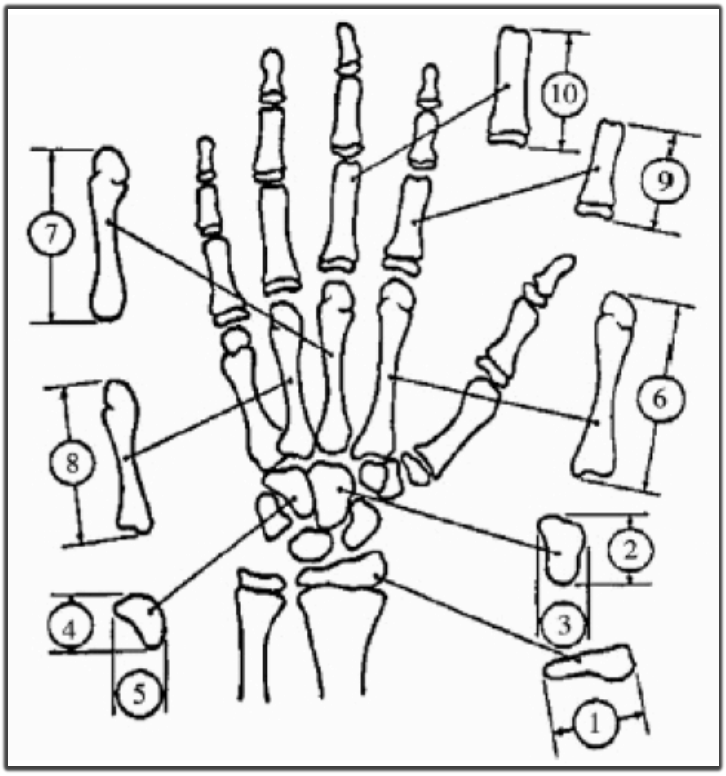


Figura 2.4: Centros de ossificação do método ER.
Fonte: Eklof e Ringertz (1967).

Para este método, após um estudo das variações normais e por meio de cálculos estatísticos, foram construídas duas tabelas, uma para cada sexo, com o padrão mínimo e máximo das medidas em milímetros de cada centro de ossificação e a idade óssea correspondente. Posteriormente, foram construídas mais duas tabelas, entretanto, com os valores médios desses padrões e suas respectivas idades ósseas.

Fishman (1982) desenvolveu um sistema que utilizava quatro fases de maturação esquelética, observadas em seis locais dos dedos (polegar, terceiro e quinto dedos) e rádio, encontrando onze indicadores estáveis de maturação esquelética de adolescentes que representava o período completo de desenvolvimento.

Haiter Neto et al. (2006) observaram que no desenvolvimento dos três métodos clássicos, GP, TW e ER, foram utilizadas amostras de indivíduos dos Estados Unidos e da Europa, por este motivo, decidiram investigar se existia uma correlação com os indivíduos brasileiros, mais específico do nordeste do Brasil.

Concluíram que para ambos os sexos não houve diferença estatística significativa entre as idades cronológicas e ósseas estimada pelas três metodologias, recomendando assim o uso nessa região.

Ainda em 2006, foi desenvolvida a ferramenta ANACARP por Olivete e Rodrigues (2006), resultado do trabalho de Olivete (2005) que simplificou o método de ER para 5 ou 3 centros de ossificação com boa precisão, e disponibilizou esta ferramenta juntamente com uma base de dados de imagens, pertencente ao Departamento de Engenharia Elétrica (EESC) da Universidade de São Paulo (USP), campus de São Carlos. Ambos os recursos estão disponíveis pelo site http://www.carpal.eesc.usp.br.

Três anos depois Olivete (2009) desenvolveu e aplicou quatro novas metodologias (Área Óssea; Número de ouro; Relação Dimensional; Proporcionalidade “Le Modulor”), que operam de forma simplificada e automática, com informações isentas da subjetividade humana, com resultados significativos.

2.2. Métodos por telerradiografias em norma lateral

A telerradiografia em norma lateral foi introduzida na Ortodontia no início da década de 30 com o objetivo de estudar o crescimento facial (BROADBENT, 1931).

A partir de então, novos estudos passaram a considerar outras estruturas presentes nas telerradiografias, anteriormente ignoradas, permitindo assim a avaliação das alterações morfológicas das vértebras cervicais, tornando-se uma metodologia alternativa e confiável para estimar a idade óssea de um indivíduo.

A Figura 2.5 mostra um exemplo deste tipo de imagem com a identificação da ROI deste trabalho, ou seja, a cervical C3.

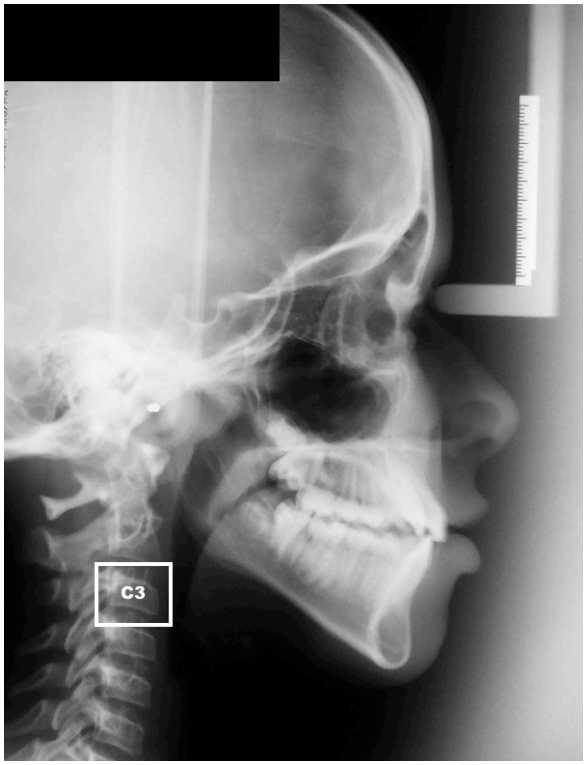


Figura 2.5: Exemplo de telerradiografia em norma lateral com a identificação da ROI.
Fonte: Moraes, Casati e Rodrigues (2013).

A ossificação vertebral é iniciada no final do período embrionário, próxima da sétima ou oitava semana de vida intrauterina. A calcificação das vértebras ocorre geralmente até os dois anos de idade, estabelecendo assim a anatomia e/ou morfologia dessas estruturas. O crescimento das vértebras ocorre principalmente no sentido vertical, sendo bastante rápido durante a infância, entretanto, diminui sua velocidade na adolescência.

Baseado nestas informações, Bench (1963) estudou e relacionou o crescimento e desenvolvimento das cervicais com a face e a posição da língua. Ele concluiu ser possível mensurar o crescimento e desenvolvimento das vértebras cervicais por meio de telerradiografias em norma lateral.

Entretanto foi no início da década de 70 que Lamparski (1972) observando as mudanças morfológicas das vértebras cervicais, mais precisamente da segunda à sexta vértebra (C2, C3, C4, C5 e C6), descreveu seis estágios de maturação e relacionou seus estágios de crescimento com a idade óssea. A Figura 2.6 exibe a morfologia das vértebras de cada estágio e logo abaixo são descritas as principais mudanças em cada estágio.

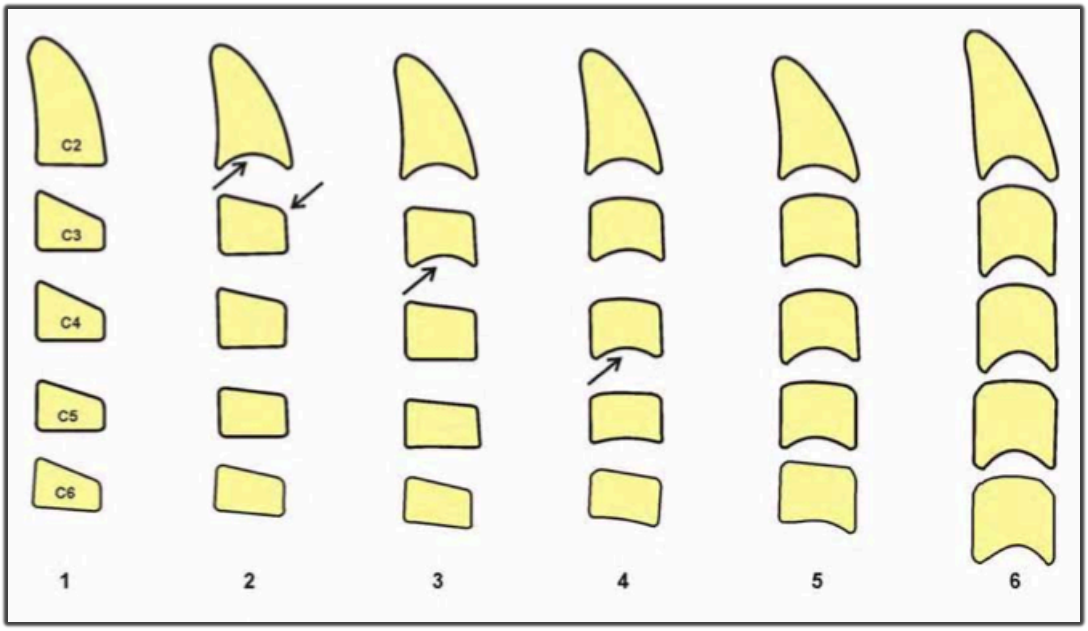


Figura 2.6: Estágios de maturação propostos por Lamparski (1972).
Fonte: Tanaka (2006, p. 40).

- **Estágio 1 (Iniciação):** bordos inferiores de C2 a C6 são planos; bordos superiores de C3 a C6 estão inclinados de posterior para anterior.
- **Estágio 2 (Aceleração):** início do desenvolvimento de concavidade no bordo inferior da C2; aumento da altura anterior de C2 a C6.
- **Estágio 3 (Transição):** concavidade no bordo inferior da C3.
- **Estágio 4 (Desaceleração):** concavidade no bordo inferior da C4; início de formação de concavidades nos bordos inferiores da C5 e C6; todas vértebras possuem forma retangular.
- **Estágio 5 (Maturação):** bordos inferiores de C2 a C6 possuem concavidades distintas; todas as vértebras possuem forma próxima de um quadrado; espaços intervertebrais reduzidos.
- **Estágio 6 (Finalização):** concavidades profundas dos bordos inferiores de C2 a C6; todas vértebras com altura maior do que a largura.

O autor concluiu que sua metodologia mostrou-se estatisticamente válida e confiável, com mesmo valor clínico quando comparado ao método carpal de GP, oferecendo como vantagem a redução de exposição do paciente à radiação. Concluiu também, que as mudanças morfológicas nas cervicais de ambos os

gêneros são semelhantes, entretanto, o sexo feminino alcança a maturação antes que o sexo masculino.

As características de maturação definidas por Lamparski serviram como base para diversos estudos que abordaram o crescimento e desenvolvimento esquelético. Abaixo serão apresentados os estudos com maior relevância ao longo das décadas.

Fishman (1979) relacionou o crescimento facial (telerradiografia em norma lateral) com registros da idade cronológica e idade óssea (radiografia carpal). Observou que na maioria dos laudos não havia correlação entre a idade cronológica e óssea. Concluiu que embora a época de início dos tratamentos ortodônticos seja baseada na idade cronológica, tal indicador não informa o estágio atual de desenvolvimento esquelético do paciente. Enfatizou a necessidade desta informação na prática clínica para a obtenção de melhores resultados nos tratamentos.

No final da década de 80, O'Reilly e Yaniello (1988) investigaram e relacionaram o crescimento mandibular com os estágios de maturação definidos por Lamparski, encontrando uma correlação com os picos de crescimento entre ambos métodos. Concluíram que a maturação vertebral pode ser utilizada com confiança para a avaliação da época de ocorrência das mudanças mandibulares na adolescência.

Em meados da década de 90, Hassel e Farman (1995) modificaram a proposta de Lampaski (1972), reduzindo de cinco para três vértebras (C2, C3 e C4) o processo de análise e avaliação dos estágios de maturação das vértebras cervicais. A escolha foi baseada pelo fato destas vértebras não serem cobertas pelo colar de proteção da tireoide no processo de aquisição da imagem de raio-X. Esta nova metodologia pode ser observada na Figura 2.7 que exibe a morfologia das vértebras de cada estágio. Logo abaixo são descritas as principais mudanças de cada estágio.

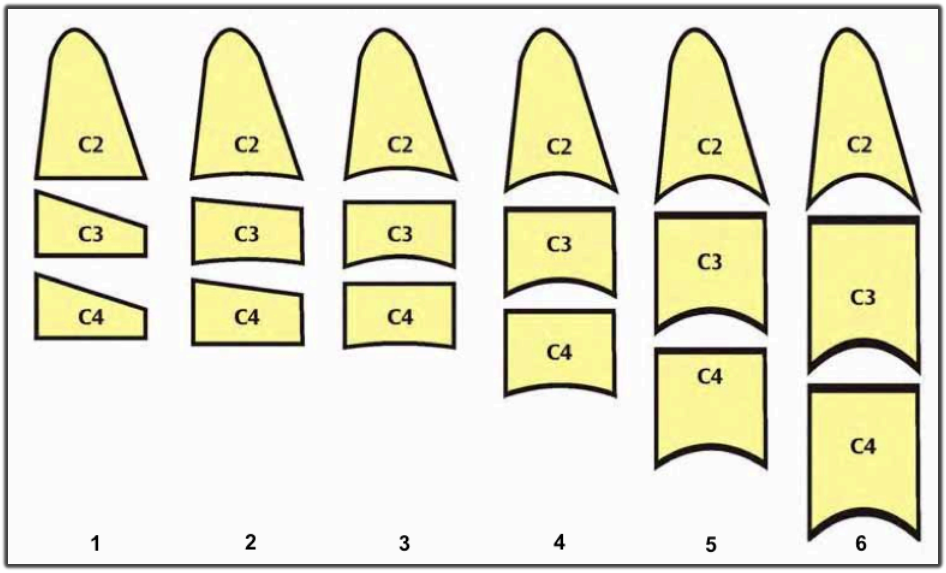


Figura 2.7: Estágios de maturação propostos por Hassel e Farman (1995).
Fonte: Adaptação de Tanaka (2006, p. 44).

- **Estágio 1 (Iniciação):** bordos inferiores de C2 a C4 são planos e achatados; bordos superiores da C3 e C4 estão inclinados de posterior para anterior; expectativa de crescimento puberal de 80% a 100%.
- **Estágio 2 (Aceleração):** início do desenvolvimento de concavidade nos bordos inferiores da C2 e C3; bordo inferior da C4 ainda plano; C3 e C4 tendendo sua forma para retangular; expectativa de crescimento puberal de 65% a 80%.
- **Estágio 3 (Transição):** concavidades mais evidentes nos bordos inferiores da C2 e C3; início do desenvolvimento de concavidade no bordo inferior da C4; C3 e C4 possuem forma retangular na horizontal; expectativa de crescimento puberal de 25% a 65%.
- **Estágio 4 (Desaceleração):** todas vértebras possuem concavidades distintas entre si no bordo inferior; C3 e C4 estão aproximando sua forma para um quadrado; expectativa de crescimento de 10% a 25%.
- **Estágio 5 (Maturação):** todas vértebras possuem concavidades acentuadas no bordo inferior; C3 e C4 possuem forma quadrada; expectativa de crescimento puberal de 5% a 10%.
- **Estágio 6 (Finalização):** todas vértebras possuem concavidades profundas no bordo inferior, com altura maior do que a largura; pouco ou nenhum crescimento puberal esperado, ou seja, crescimento completo.

Os autores correlacionaram a maturação das vértebras cervicais por seu método com a maturação esquelética carpal de acordo com Fishman (1982). Concluíram que sua metodologia é confiável para a avaliação da maturação esquelética, estimando o período de crescimento atual do paciente, informação de grande valia para o ortodontista.

No início do século XXI, Baccetti, Franchi e McNamara Jr. (2002) propuseram uma versão melhorada para a avaliação da maturação óssea por meio das vértebras cervicais. Nesta proposta os autores analisaram a morfologia da segunda a quarta vértebra (C2, C3 e C4), tanto visualmente quanto cefalometricamente.

Para a análise visual consideraram a concavidade no bordo inferior da C2, C3 e C4 e a forma do corpo da C3 e C4, classificadas como trapezoidal, retangular na horizontal, quadrada e retangular na vertical.

Para a análise cefalométrica foram considerados cinco pontos para cada vértebra, dos quais quatro estão localizados nos vértices dos corpos vertebrais, e o último na maior profundidade do bordo inferior das vértebras. Com tais marcações mediram: a profundidade do bordo inferior da C2, C3 e C4; as razões entre o comprimento da base e a altura anterior da C3 e C4 e as razões entre as alturas posterior e anterior da C3 e C4.

Após realizarem as análises citadas anteriormente, os autores reclassificaram os estágios de maturação das vértebras cervicais (EMVC) em cinco estágios, exibidos na Figura 2.8 e melhor descritos logo abaixo da mesma.

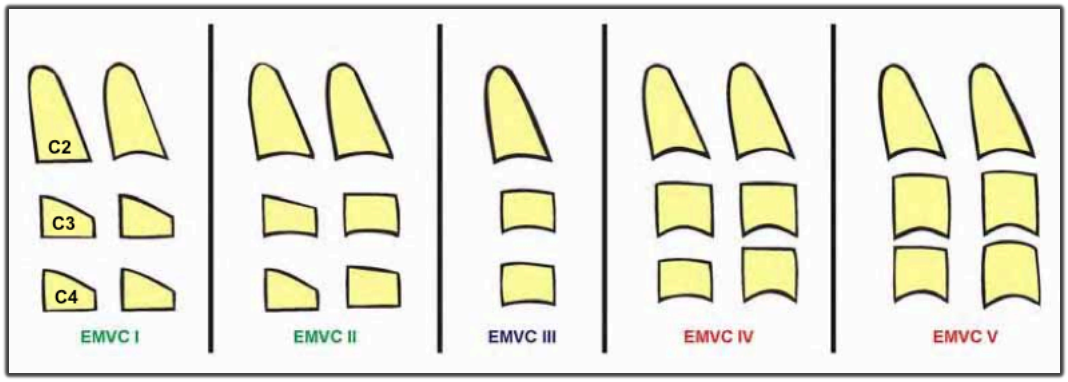


Figura 2.8: Estágios de maturação propostos por Baccetti, Franchi e McNamara Jr. (2002).
Fonte: Adaptação de Tanaka (2006, p. 55).

- **EMVC I:** C2, C3 e C4 com bordos inferiores planos, com exceção da C2 que em 50% dos casos permite uma pequena concavidade; forma trapezoidal da C3 e C4 com bordos superiores inclinados de posterior para anterior; pico de crescimento mandibular não ocorrerá antes de um ano a partir deste estágio.
- **EMVC II:** concavidade nos bordos inferiores da C2 e C3; forma trapezoidal ou retangular na horizontal da C3 e C4; pico de crescimento mandibular ocorrerá um ano a partir deste estágio.
- **EMVC III:** concavidade nos bordos inferiores da C2, C3 e C4; forma retangular na horizontal da C3 e C4; pico de crescimento mandibular ocorreu entre um ou dois anos antes desde estágio.
- **EMVC IV:** concavidade nos bordos inferiores da C2, C3 e C4; forma quadrada da C3 e/ou C4, ou seja, pelo menos uma ou as duas vértebras; pico de crescimento mandibular ocorreu até um ano antes desde estágio.
- **EMVC V:** concavidade nos bordos inferiores da C2, C3 e C4; forma retangular na vertical da C3 e/ou C4, ou seja, pelo menos uma ou as duas vértebras; pico de crescimento mandibular ocorreu há mais de dois anos antes deste estágio.

Os autores concluíram que a vantagem da sua versão para a avaliação da maturação óssea por meio das vértebras cervicais, é que pode ser executada baseada em um simples cefalograma, analisando somente as vértebras C2, C3 e C4, que são visíveis mesmo com o protetor de tireoide.

Entretanto, em 2005 esta metodologia passou por uma revisão pelos próprios autores (BACCETTI; FRANCHI; MCNAMARA JR., 2005), dividindo a maturação das vértebras cervicais (EMVC) em seis estágios, exibidos na Figura 2.9 e melhor descritos logo abaixo da mesma.

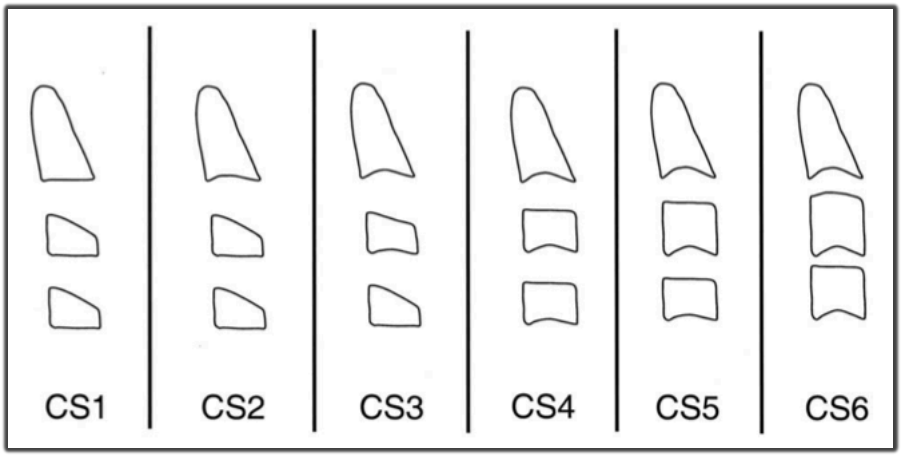


Figura 2.9: Estágios de maturação propostos por Baccetti, Franchi e McNamara Jr. (2005).
Fonte: Baccetti, Franchi e McNamara Jr. (2005, p. 124).

- **CS1:** C2, C3 e C4 com bordos inferiores planos; forma trapezoidal da C3 e C4 com bordos superiores inclinados de posterior para anterior; pico de crescimento mandibular ocorrerá em média dois anos após esta fase.
- **CS2:** concavidade no bordo inferior da C2; os corpos da C3 e C4 ainda estão na forma trapezoidal; pico de crescimento mandibular ocorrerá em média um ano após esta fase.
- **CS3:** concavidade nos bordos inferiores da C2 e C3; forma trapezoidal ou retangular na horizontal da C3 e C4; pico de crescimento mandibular ocorrerá durante o ano depois desta fase.
- **CS4:** concavidade nos bordos inferiores da C2, C3 e C4; forma retangular na horizontal da C3 e C4; pico de crescimento mandibular ocorreu dentro de um ou dois anos antes desta fase.
- **CS5:** concavidade nos bordos inferiores da C2, C3 e C4; forma quadrada da C3 e/ou C4, ou seja, pelo menos uma ou as duas vértebras se não quadrada a outra vértebra possui forma retangular na horizontal; pico de crescimento mandibular ocorreu pelo menos há um ano antes desta fase.
- **CS6:** concavidade nos bordos inferiores da C2, C3 e C4; forma retangular na vertical da C3 e/ou C4, ou seja, pelo menos uma ou as duas vértebras se não retangular na vertical a outra vértebra possui forma quadrada; pico de crescimento mandibular ocorreu pelo menos há dois anos antes desta fase.

Após análise estatística os autores concluíram que sua nova versão para a avaliação da maturação óssea permite identificar clinicamente o momento adequado para os tratamentos ortodônticos, e devido a sua praticidade pode ser uma poderosa ferramenta aos diagnósticos.

Também no início do século XXI, Mito, Sato e Mitani (2002) com o propósito de estabelecer uma nova metodologia para identificar a maturidade esquelética por meio de avaliação das vértebras cervicais realizaram dois estudos. No primeiro estudo mediram os corpos da terceira e quarta vértebra, ou seja, C3 e C4, e por meio de regressão determinaram uma expressão (equação 2.1) para a obtenção da idade óssea vertebral.

$$-0{,}20 + 6{,}20\times\frac{AH_3}{AP_3} + 5{,}90\times\frac{AH_4}{AP_4} + 4{,}74\times\frac{AH_4}{PH_4}\ , \qquad (2.1)$$

em que *AH* é a distância do topo da parte frontal à tangente da parte inferior, *AP* é a distância anterior-posterior no meio do corpo vertebral e *PH* é a distância do topo da parte de trás à tangente da parte inferior. Os índices 3 e 4 representam as vértebras C3 e C4 respectivamente. Para melhor compreender os termos, os mesmos podem ser abstraídos pela Figura 2.10.

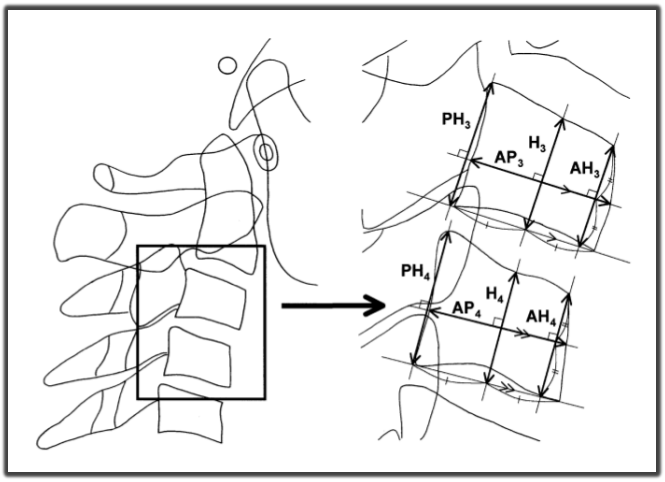


Figura 2.10: Métricas utilizadas na equação de Mito, Sato e Mitani (2002).
Fonte: Mito, Sato e Mitani (2002, p. 382).

No segundo estudo, correlacionaram a idade óssea vertebral do seu método com a idade óssea carpal por TW2, obtendo como coeficiente de correlação o valor

0,869, considerado significativo ($p < 0,05$) quando comparado a relação entre idade óssea vertebral e idade cronológica, com valores de correlação de 0,705. Como valor absoluto da diferença entre os métodos foi encontrado o valor de 0,75 anos, também considerado significativo ($p < 0,001$) em relação ao valor 1,17 de correlação encontrado entre idade óssea vertebral e idade cronológica.

Os autores concluem que a idade óssea vertebral reflete a maturidade óssea porque se aproxima muito da idade óssea carpal, esta última considerada como indicador fiel da maturação esquelética.

Ainda no início do século XXI, San Román et al. (2002) buscando validar o uso de radiografia das vértebras cervicais para predizer a maturação esquelética, desenvolveram um método baseado nas mudanças que ocorriam na concavidade da borda inferior, na altura e no formato dos corpos das vértebras cervicais.

A concavidade dos corpos das vértebras (C2 a C6) foi dividida em seis estágios, e considerada existente quando possuía distância maior que 1 mm do centro da borda inferior até linha imaginária do canto posterior-inferior com o canto anterior-inferior.

Para a altura foram avaliadas as vértebras C3 e C4, dividida em quatro estágios, calculadas a partir do centro do corpo de cada cervical. Para o formato também foram avaliadas apenas as vértebras C3 e C4, entretanto, dividido em seis estágios, diferidos pela proporção da razão entre altura e largura, novamente calculadas a partir do centro do corpo de cada cervical.

Por meio de regressão múltipla em função de três variáveis (número do estágio da concavidade, altura e forma), foram encontradas duas equações para a estimação da maturação esquelética, uma para cada gênero, masculino (equação 2.2, com três variáveis) e feminino (equação 2.3, com duas variáveis).

$$-0,838 + (0,771 \times concavidade) + (0,840 \times altura) + (0,229 \times forma) \ , \qquad (2.2)$$

$$0,029 + (0,914 \times concavidade) + (0,745 \times altura) \ , \qquad (2.3)$$

sendo que *concavidade* é a distância do centro da borda inferior até linha imaginária do canto posterior-inferior com o canto anterior-inferior, *altura* é a distância do bordo

superior até o bordo inferior calculada a partir do centro do corpo vertebral e *forma* é a proporção da razão entre altura e largura.

A estimação da maturação esquelética por este método obteve boa correlação quando comparado com a maturação carpal, com valor de 0,85 para o sexo feminino e 0,79 para o masculino, com diferença entre os sexos considerada estatisticamente significativa ($p < 0,05$). Para esta amostra os autores consideraram que sua proposta foi tão precisa quanto o de Hassel e Farman (1995), porém, superior ao método de Lamparski (1972).

Os parâmetros anatômicos de concavidade, altura e forma foram avaliados e comparados individualmente com o carpal. A concavidade obteve alta correlação (feminino: 0,82; masculino: 0,75). A altura obteve uma boa correlação (feminino: 0,74; masculino: 0,67), enquanto o formato obteve a menor correlação (feminino: 0,70; masculino: 0,60). Baseado em tais análises os autores concluem que o parâmetro morfológico que melhor estima a maturação esquelética foi a concavidade da borda inferior do corpo vertebral, permitindo então a substituição das radiografias carpais.

Seedat e Forsberg (2005) por meio de amostras de africanos da raça negra, estudaram as mudanças morfológicas do corpo vertebral da C3 e compararam com os formatos propostos por Hassel e Farman (1995), obtendo resultados semelhantes. A escolha da C3 como único corpo para a análise foi que esta estrutura possui boa visualização nas telerradiografias. Os autores identificaram detalhes sutis nunca descritos na literatura odontológica, são eles: forma de chanfros laterais nos bordos inferiores (forma de lábio), forma de “S” nos bordos superiores e a presença de arredondamento dos cantos inferiores.

Concluíram que os chanfros, presentes no estágio de transição e desaceleração, são indicativos do início da puberdade, fornecendo informações acerca do pico de crescimento. Sobre a forma de “S”, concluíram que é indicativo de crescimento ativo esquelético, ocorrendo no estágio de iniciação e aceleração. E sobre a presença de arredondamento dos cantos inferiores, concluíram que indica nenhum ou quase nenhum crescimento, presentes no estágio de maturação e finalização.

Dois anos depois, Caldas (2007) avaliou a aplicabilidade do método para a estimação de idade óssea por meio das vértebras cervicais de meninas japonesas proposto por Mito, Sato e Mitani (2002), na população brasileira. Posteriormente propôs uma nova metodologia baseada na regressão de medidas das vértebras C3 e C4, para estimar a idade óssea de ambos gêneros, feminino (equação 2.4) e masculino (equação 2.5), de nacionalidade brasileira.

$$1{,}3523 + 6{,}7691 \times \frac{AH_3}{AP_3} + 8{,}6408 \times \frac{AH_4}{AP_4}\,, \tag{2.4}$$

$$1{,}4892 + 11{,}3736 \times \frac{AH_3}{AP_3} + 4{,}8726 \times \frac{H_4}{AP_4}\,, \tag{2.5}$$

em que *AH* é a distância do topo da parte frontal à tangente da parte inferior e *AP* é a distância anterior-posterior no meio do corpo vertebral. Os índices 3 e 4 representam as vértebras C3 e C4 respectivamente.

Para a análise de confiabilidade da proposta foi utilizado como referência o TW3. Os resultados para o método proposto revelaram não haver diferença estatística entre a idade óssea da vértebra cervical, idade esquelética e idade cronológica, sendo confiáveis para ambos gêneros de nacionalidade brasileira. Em contra partida, a proposta de Mito, Sato e Mitani (2002) permitiu ser aplicado apenas para o sexo feminino de ambas nacionalidade, brasileira e japonesa.

No ano seguinte, Tanaka (2008) propôs um novo método para a análise da maturação óssea denominado Maturação por Razões em Vértebras Cervicais (MRVC), classificado em 7 estágios. A proposta baseia-se nas razões de medidas das vértebras C2, C3 e C4, utilizando para isto o software Radiocef[1]. Inicialmente foram consideradas 15 razões, entretanto, por meio das análises ANOVA e Tukey, identificou-se 10 razões como as que melhor diferiram cada estágio.

Para a validação da metodologia proposta uma amostra foi inspecionada por quatro examinadores e avaliada por três métodos: Curva de Crescimento de Martins

[1] Aplicativo comercial que produz análises cefalométricas, laudos por imagens e documentações. Site: http://www.radiomemory.com.br.

e Sakima[2] (1977 apud TANAKA, 2008, p. 62) adaptado por Mercadante[3] (1996 apud TANAKA, 2008, p. 62); Hassel e Farman (1995) e seu próprio método (MRVC). A Curva de Crescimento foi a que alcançou melhor desempenho intra e inter-examinadores, entretanto, o MRVC obteve resultados próximos ao da Curva de Crescimento, concluindo assim que sua proposta é eficaz.

No mesmo ano, Jaqueira (2008) aplicou e analisou três métodos para a estimação da maturação óssea por meio das cervicais, Hassel e Farman (1995), Baccetti, Franchi e McNamara Jr. (2002) e Seedat e Forsberg (2005), com o objetivo de verificar qual apresentava maior aplicabilidade clínica e se existiam correspondência entre os mesmos.

A amostra foi avaliada por quatro examinadores. Os dados foram submetidos à analise estatística por meio do software Stata[4] e classificados em cinco categorias de concordância (muito fraco, fraco, regular, bom e excelente). Os resultados indicaram a existência de concordância “regular” e “bom” para os três métodos, com valores de 0,55% e 0,68%. Na avaliação entre os avaliadores obteve concordância “bom” entre Hassel e Farman (1995) e Baccetti, Franchi e McNamara Jr. (2002). Entretanto, não houve concordância para o método de Seedat e Forsberg (2005), ou seja, não apresenta aplicabilidade clínica. Concluíram que a proposta de Baccetti, Franchi e McNamara Jr. (2002) proporcionou maior índice de concordância tanto entre os métodos quanto entre os examinadores, aprovando sua aplicabilidade clínica.

Dois anos depois, Caldas, Ambrosano e Haiter Neto (2010) desenvolveram uma análise assistida por computador para a estimação da maturação esquelética em radiografias cefalométricas de indivíduos brasileiros (regiões das amostras: Norte, Nordeste, Centro-Oeste e Sul). Para a obtenção das medidas dos corpos das vértebras foi utilizado o software Radiocef. A idade óssea vertebral foi calculada automaticamente pelas equações de regressão desenvolvidas por Caldas (2007). Para a idade óssea carpal foi utilizado o TW3.

---

[2] MARTINS, J.C.R.; SAKIMA, T. Considerações sobre o surto de crescimento puberal. **Ortodontia**, v.10, n. 3, p. 164-170, 1977.
[3] MERCADANTE, M.M.N. Radiografia de mão e punho. In: Ferreira FV. Ortodontia: diagnóstico e planejamento. 1. ed. São Paulo: Artes Médicas; 1996. p. 188-216.
[4] Aplicativo comercial para análise de dados e estatísticas. Site: http://www.stata.com.

Para comparar a idade óssea vertebral, idade óssea carpal e idade cronológica, os dados passaram por análise estatística de variância (ANOVA) e teste de Tukey ($p < 0,05$). Os resultados não apresentaram diferenças estatísticas significantes entre idade óssea vertebral e idade cronológica para todas regiões estudadas. Concluíram que as equações desenvolvidas por Caldas (2007) para a estimação de idade óssea por meio das vértebras cervicais mostraram-se confiáveis, permitindo seu uso nos indivíduos das regiões estudadas.

No ano seguinte, Baptista et al. (2011) desenvolveram um classificador de padrões baseado em Baccetti, Franchi e McNamara Jr. (2005). Para a construção da base de dados foram utilizados dois examinadores, o primeiro realizou a coleta manualmente e o segundo marcou os pontos de interesse por meio de um programa computacional desenvolvido para este fim. Por meio do software Weka[5] foram avaliados seis classificadores, um para cada estágio, com base no algoritmo Bayesiano Ingênuo.

Os resultados da avaliação de área sob a curva ROC para cada um dos seis estágios foram 0,88, 0,74, 0,86, 0,76, 0,82 e 0,92 respectivamente. Os autores concluíram que o software de marcação de pontos mostrou-se útil, com alta capacidade de armazenamento e reprodução de forma exata a qualquer momento. Portanto, os resultados indicam que o classificador de padrões auxilia o ortodontista a identificar o atual estágio de maturação cervical de um indivíduo.

2.3. Considerações finais

Conforme proposto, este capítulo apresentou as origens e os principais métodos de estimação de idade óssea para as duas ROI, carpal e cervical, bem como sua evolução ao longo das décadas, finalizando com as pesquisas recentes para ambas ROI.

[5] Coleção de algoritmos para mineração de dados na área de Inteligência Artificial.
Site: http://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka.

Como pôde ser observado, nas duas últimas décadas vem sendo intensificada as pesquisas para a estimação e maturação óssea por meio de análise das vértebras cervicais, aprovando sua confiabilidade e aplicabilidade clínica.

Entretanto, pôde ser comprovado que ainda não existe uma metodologia automática, com boa precisão, simples, rápida e eficiente, utilizada pelos profissionais e especialistas da área.

3. METODOLOGIA

O desenvolvimento do trabalho foi dividido em duas fases: a primeira foi a implementação de técnicas de processamento digital de imagens para testar, modificar e/ou criar algoritmos de pré-processamento, segmentação e extração de características, sendo esses resultados extraídos do trabalho de Moraes et al. (2012a). A segunda fase, responsável pela estimação de idade óssea, surgiu como estudos propostos e previamente apresentados em dois trabalhos, Moraes et al. (2012b) e Moraes, Casati e Rodrigues (2013). Para a implementação das rotinas de ambas as fases foi utilizada a plataforma MATLAB[6] (Matrix Laboratory). A escolha foi baseada na versatilidade da mesma, permitindo um desenvolvimento mais simples, rápido e eficiente.

3.1. Aquisição de imagem

A primeira etapa para a execução deste trabalho é a aquisição das imagens, que foram utilizadas na aplicação de técnicas de processamento de imagem e análise morfológica das cervicais. Para isto tem-se disponíveis duas bases de imagens, um longitudinal e outro transversal. A diferença é que as bases longitudinais são compostas por radiografias dos mesmos indivíduos em diferentes momentos do tempo, ou seja, as tomadas radiográficas do mesmo indivíduo ocorreram em datas diferentes, visando o acompanhamento e desenvolvimento das alterações morfológicas. Em contrapartida, as bases transversais são compostos por diferentes indivíduos, permitindo que as tomadas radiográficas ocorram em qualquer momento do tempo, sem a necessidade de acompanhamento.

A primeira base é composta por amostras longitudinais com 173 telerradiografias em norma lateral pareadas com radiografias carpais (laudadas por ER), pertencentes aos arquivos da Disciplina de Ortodontia, Departamento de Clínica Infantil, Faculdade de Odontologia de Araraquara, Universidade Estadual

[6] Software comercial que fornece um ambiente de programação para desenvolvimento de algoritmos, análise de dados, visualização e cálculo numérico. Possui uma ampla gama de aplicações incluindo processamento de imagem. Site: http://www.mathworks.com/products/matlab.

Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, Araraquara, São Paulo, Brasil. Esta amostra é composta por 33 indivíduos (18 meninas e 15 meninos), com idade inicial de 7 a 9 anos. As tomadas radiográficas foram iniciadas em 2005, obtidas na mesma data, anualmente, durante 7 anos. A digitalização foi realizada com resolução de 300 dpi, com 24 bits de profundidade e armazenadas no formato TIFF.

O acompanhamento anual dos pacientes é uma característica muito forte desta base, que permitiu investigar o real crescimento e desenvolvimento das vértebras cervicais, explorando de forma fiel as características de comportamento que outras bases não permitem. Outra característica forte é a padronização das tomadas radiográficas, pois foi utilizado o mesmo aparelho, com a mesma configuração e o mesmo posicionamento e alinhamento do paciente. Por esta base ser bem controlada, tende a facilitar os algoritmos de processamento de imagem.

A Figura 3.1 exibe a distribuição das amostras da base de dados longitudinal, construída de acordo com as faixas etárias e gêneros disponíveis.

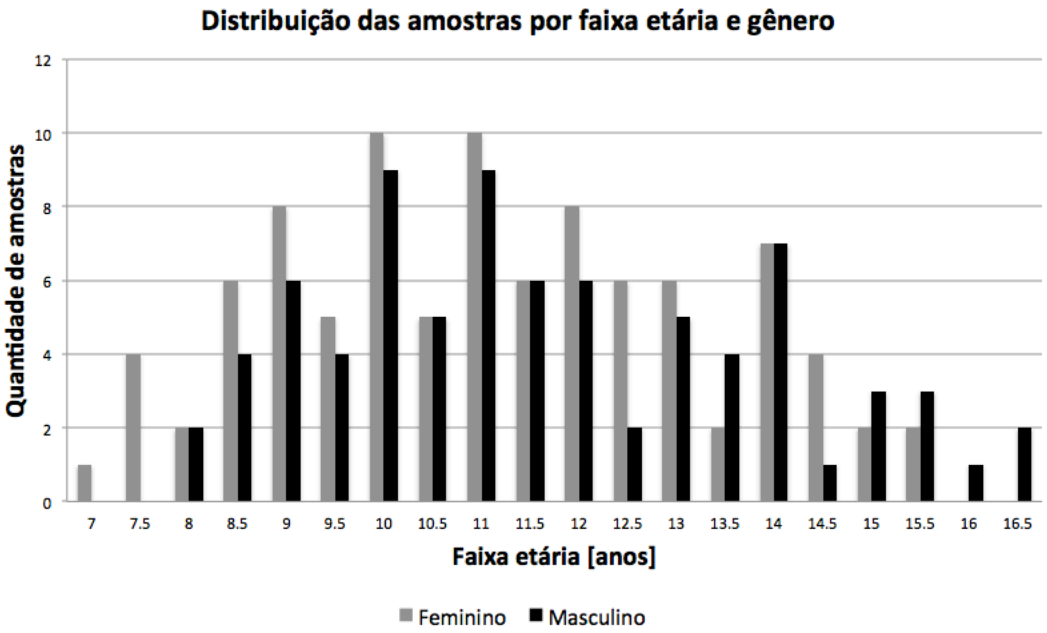


Figura 3.1: Distribuição de amostras longitudinais por faixa etária e gênero.

A segunda base é composta por amostras transversais de telerradiografias em norma lateral pareadas com radiografias carpais, pertencentes a FOP (Faculdade de Odontologia de Piracicaba) da UNICAMP, Piracicaba, São Paulo, Brasil, utilizado no trabalho de Caldas (2009). Esta base de imagens é composta por informações de 591 indivíduos (318 meninas e 273 meninos), com faixa etária

variando entre 9 e 16 anos, reunidas de arquivos digitais de seis clinicas de radiologia odontológica provenientes das regiões Norte, Nordeste, Centro-Oeste e Sul do Brasil. Todas as imagens estão laudadas, ou seja, possuem informações de idade óssea. O laudo das telerradiografias foi obtido pelo método de Caldas (2007), e o laudo das radiografias carpais pelo método TW3. Além dos laudos a base forneceu as medidas das características referentes a C3 e C4, são elas: altura anterior (AH); altura posterior (PH); altura média (H) e largura ântero-posterior (AP). Tais características já foram apresentadas na Figura 2.10 e o procedimento para localizar estes pontos pode ser encontrado em Caldas (2009, p. 18-21).

A característica forte desta base é a diversidade das amostras, pois é composto por diferentes regiões do Brasil. Isto permite avaliar a capacidade de generalização de metodologias propostas para a estimação e maturação óssea, validando assim a aplicação clínica dos laudos para a população brasileira.

A Figura 3.2 exibe a distribuição das amostras da base de dados transversal, construída de acordo com as faixas etárias e gêneros disponíveis.

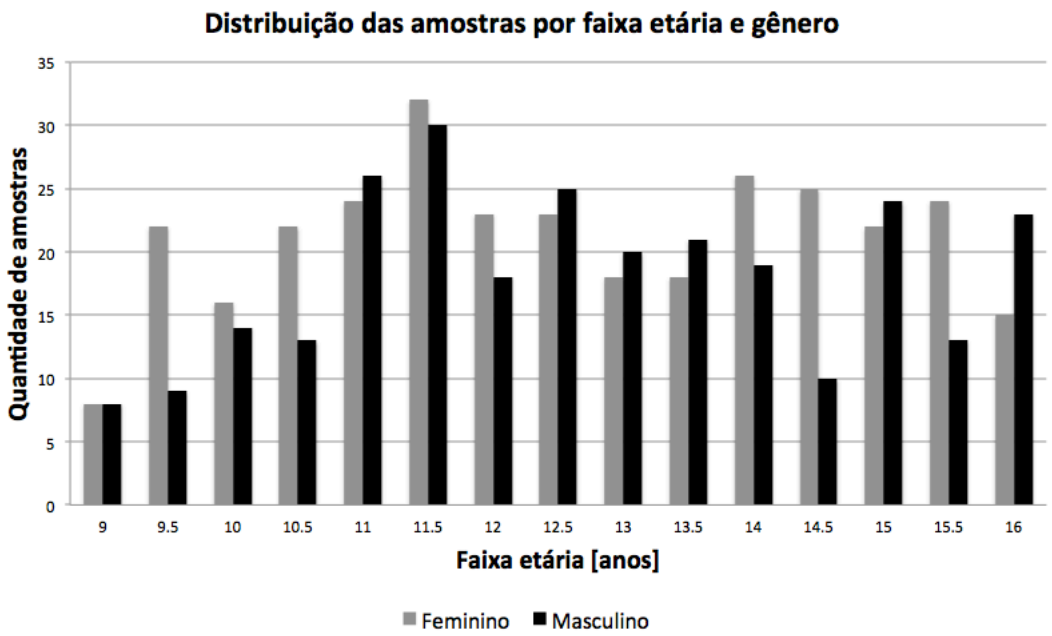


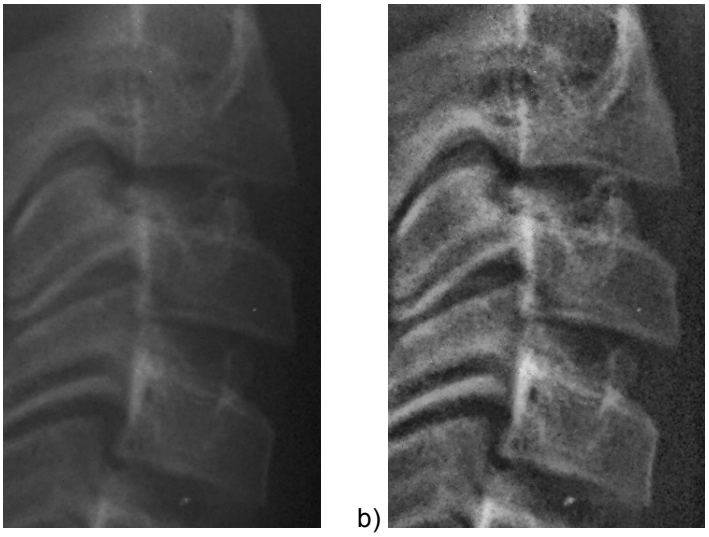
Figura 3.2: Distribuição de amostras transversais por faixa etária e gênero.

Por meio de testes experimentais observou-se diferenças sutis, porém essenciais para o bom funcionamento dos próximos algoritmos, optando pela conversão das imagens de entrada do espaço de cores RGB (*red*; *green*; *blue*) para

HSV (*hue*; *saturation*; *value*), utilizando como entrada para os algoritmos apenas o último canal, V, com classe do tipo *double* e valores de intensidade entre 0 e 1.

3.2. Pré-processamento

Ao analisar as imagens digitalizadas verificou-se a necessidade de pré-processar as mesmas, pois tais imagens possuem baixo contraste entre ossos, tecidos e músculos, dificultando assim a segmentação desse tipo de imagem. Para este cenário operadores globais não são eficazes. Portanto, optou-se pela equalização de histograma adaptativo por contraste limitado, definido por Zuiderveld (1994), função “adapthisteq” do MATLAB. Este método opera em regiões pequenas chamadas *tiles* ao invés da imagem como um todo. Ao final as *tiles* vizinhas são combinadas por meio de interpolação bilinear para eliminar as fronteiras artificias criadas no processo. A Figura 3.3 mostra a imagem resultante desta técnica. Porém, para melhor demonstração, para todas as figuras a seguir serão apresentadas apenas parte da imagem com foco na ROI e sua vizinhança, ou seja, as vértebras C2, C3 e C4.



a) b)

Figura 3.3: (a) imagem HSV; (b) imagem após equalização de histograma por região.

3.3. Segmentação

A segmentação é um dos principais desafios deste trabalho devido a baixa qualidade das imagens de telerradiografias conforme citado na seção 3.2.

O trabalho almeja uma metodologia automática com boa capacidade de generalização e precisão para isolar as cervicais. Entretanto, por meio de diversos testes dos algoritmos clássicos da literatura foi possível comprovar a dificuldade de processamento deste tipo de imagem. Observou-se que utilizando apenas uma técnica ou mesmo um conjunto em sequência de técnicas clássicas, os resultados não alcançaram as expectativas. Portanto, considerando tais informações, o melhor caminho para a fase de segmentação é descrito logo abaixo.

Inicialmente realizou-se a binarização por histograma da imagem pré-processada com *threshold* definido pelo método de Otsu (1979), função "graythresh" no MATLAB, que converte uma imagem em tons de cinza para uma imagem binária, definindo como *threshold* o valor que minimiza a variância intra-classe dos pixels pretos e brancos (Figura 3.4a). O Resultado pode ser observado na Figura 3.4b.

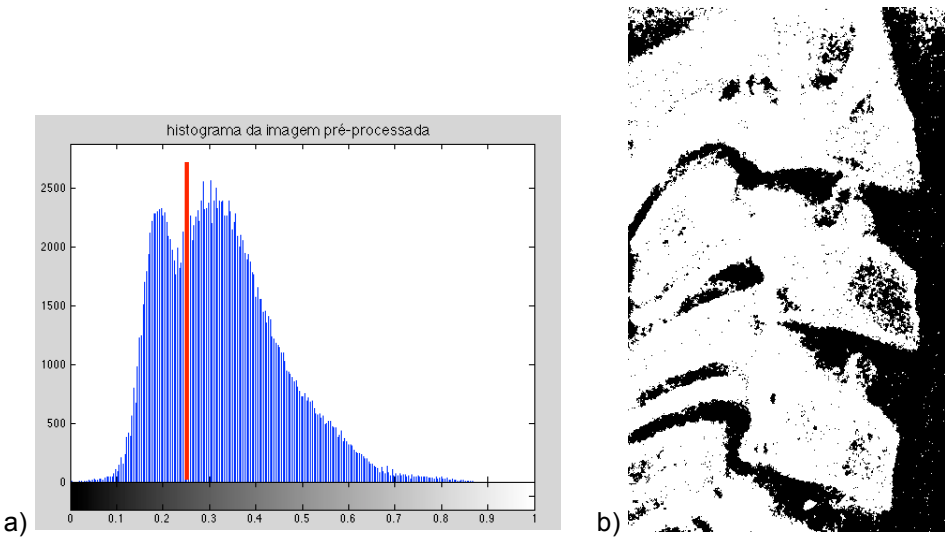


Figura 3.4: (a) histograma com *threshold* pelo método de Otsu; (b) binarização.

Posteriormente, com o objetivo de remover estruturas que não são utilizadas nas análises das cervicais, foi desenvolvida uma rotina baseada na imagem HSV (sem nenhum processamento), que divide a imagem na horizontal em cinco partes iguais. Uma máscara de 40x20 pixels varre cada uma dessas partes armazenando o valor da média para cada posição, para posteriormente identificar a região onde a máscara possuiu maior intensidade. Esta região coincide na divisão do corpo da

vértebra com a espinha, esta última desnecessária nas análises de estimação pelas cervicais deste trabalho.

Com a posição da maior intensidade de cada uma das cinco partes da imagem e por meio de interpolação linear, função “interp1” do MATLAB, são encontrados todos os pontos para que seja isolada apenas a ROI. A Figura 3.5 mostra este processo de interpolação e o resultado aplicado na imagem binarizada.

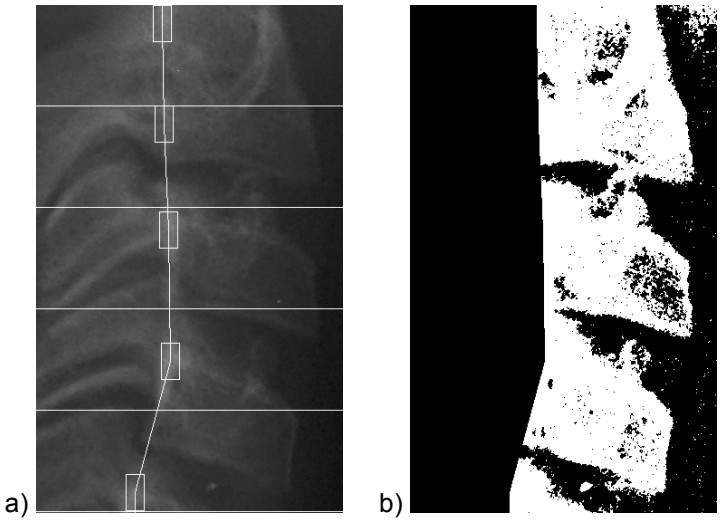


Figura 3.5: (a) processo de interpolação; (b) aplicação na imagem binarizada.

O próximo passo é a remoção de ruídos. Para isto foi utilizado um filtro de suavização (passa-baixa) por meio da média da vizinhança de 15x15 pixels.

Em seguida é aplicada a técnica *Flood*, função “imfill” com parâmetro *holes* do MATLAB, que por meio de operações morfológicas (fechamento), preenche os buracos internos dos objetos. Buracos são identificados quando um conjunto de pixels de fundo (pixels pretos) não podem ser alcançados através do preenchimento do fundo a partir da borda da imagem (pixels brancos).

Por último, são removidos os objetos com áreas pequenas, função “bwareaopen” do MATLAB, que utiliza operações morfológicas (abertura). Os resultados para os processos citados acima podem ser observados na Figura 3.6.

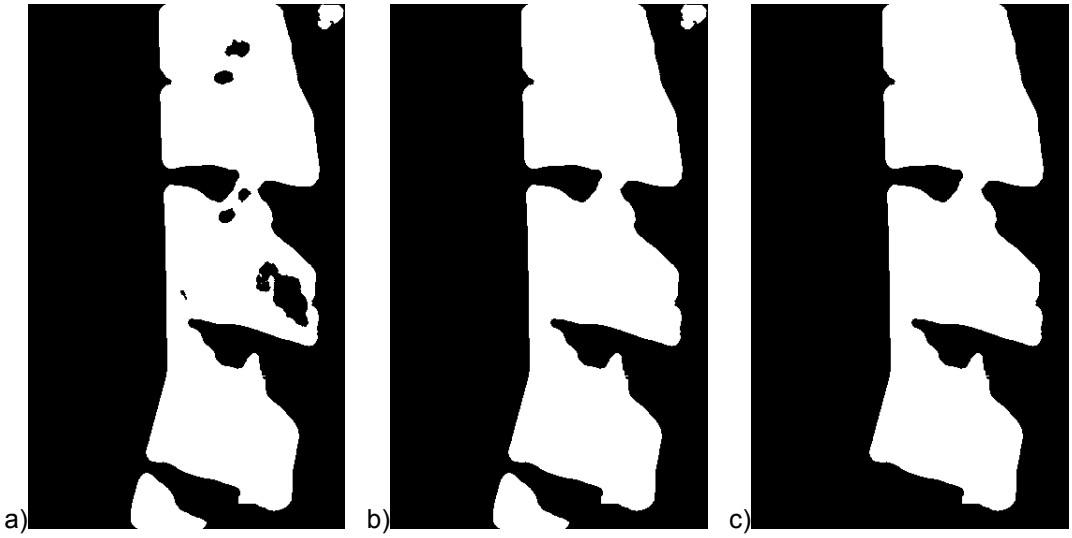


Figura 3.6: (a) remoção de ruídos; (b) preenchimento de buracos; (c) remoção de objetos pequenos.

3.4. Extração de características

Após a fase de segmentação é necessária a extração de características, pois as mesmas são utilizadas em métodos de estimação e maturação óssea.

Após a revisão na literatura sobre a maturação esquelética por meio de telerradiografias, identificou-se que o crescimento e desenvolvimento da concavidade do bordo inferior das cervicais mostrou-se homogêneo (BACCETTI; FRANCHI; MCNAMARA JR., 2005; HASSEL; FARMAN, 1995; LAMPARSKI, 1972), inclusive sendo utilizada a altura do seu ponto médio em alguns métodos, como por exemplo o de San Román et al. (2002).

Baseado nesta informação, Moraes et al. (2012b) levantaram a hipótese de identificar o polinômio que descrevesse a curva da concavidade do bordo inferior das cervicais, informação esta nunca utilizada em métodos descritos na literatura do assunto. O objetivo foi investigar algum comportamento que permitisse ser utilizado como característica para auxiliar a estimação de idade óssea.

Na Figura 3.7 é apresentado um diagrama dos processamentos computacionais para esta proposta. A seguir os mesmos são descritos em detalhes e exemplificados.

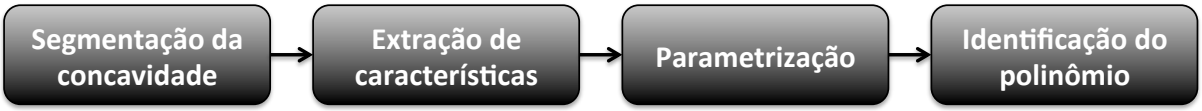


Figura 3.7: Sequência dos processamentos computacionais.

Segmentação da concavidade: antes da segmentação é necessária uma única interação do usuário, trata-se da demarcação da concavidade (Figura 3.8a). Este procedimento pode ser realizado por qualquer editor de imagem, desde que seja realizado na cor branca, com espessura de 1 *pixel* e sem o uso de filtro *antialising*. Realizado tal procedimento a imagem é facilmente segmentada e binarizada (Figura 3.8b) pelo maior *thresholding* identificado na imagem. Esta interação manual deixa a sensação de subjetividade no procedimento, porém, no processamento para a identificação do polinômio ocorre a interpolação/aproximação dos pontos, corrigindo assim possíveis subjetividades na demarcação.

Extração de características: para coletar os pontos da concavidade, construiu-se um procedimento que realiza varreduras verticais na imagem a procura dos pixels brancos (concavidade) e armazena as suas coordenadas (x,y) em dois vetores (Figura 3.8c).

Parametrização: para manipular os polinômios com maior precisão é necessário que os mesmos estejam ajustados, ou seja, com a mesma dimensão, direção e alinhados no eixo de coordenadas (0,0). Para isto foram desenvolvidas rotinas que utilizam matriz de rotação, translação e escala, todas baseadas em métodos consagrados de computação gráfica (FOLEY, 1990). No final é realizada uma nova amostragem a fim de padronizar as amostras (Figura 3.8d).

Este procedimento é necessário para que os polinômios sejam extraídos de forma padronizada, caso contrário não seria possível investigar e identificar o comportamento dos mesmos. Para comprovar esta necessidade foi extraído o polinômio de uma concavidade, posteriormente ao mudar sua posição espacial ou variar a sua resolução, ao extrair novamente o polinômio os mesmos apresentaram diferentes coeficientes, quando na verdade referem-se a mesma concavidade.

Identificação do polinômio: após a parametrização são extraídos os coeficientes do polinômio de 4º grau (equação 3.1), função “polyfit” do MATLAB, que por meio do ajuste de curva polinomial identifica os coeficientes pelo método dos Mínimos Quadrados (Figura 3.8e). A escolha do grau foi baseada na morfologia da

concavidade e comprovada experimentalmente pela ferramenta “splinetool” do MATLAB, que permite analisar o erro de acordo com o grau desejado.

$$f(x) = ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx + e \ , \tag{3.1}$$

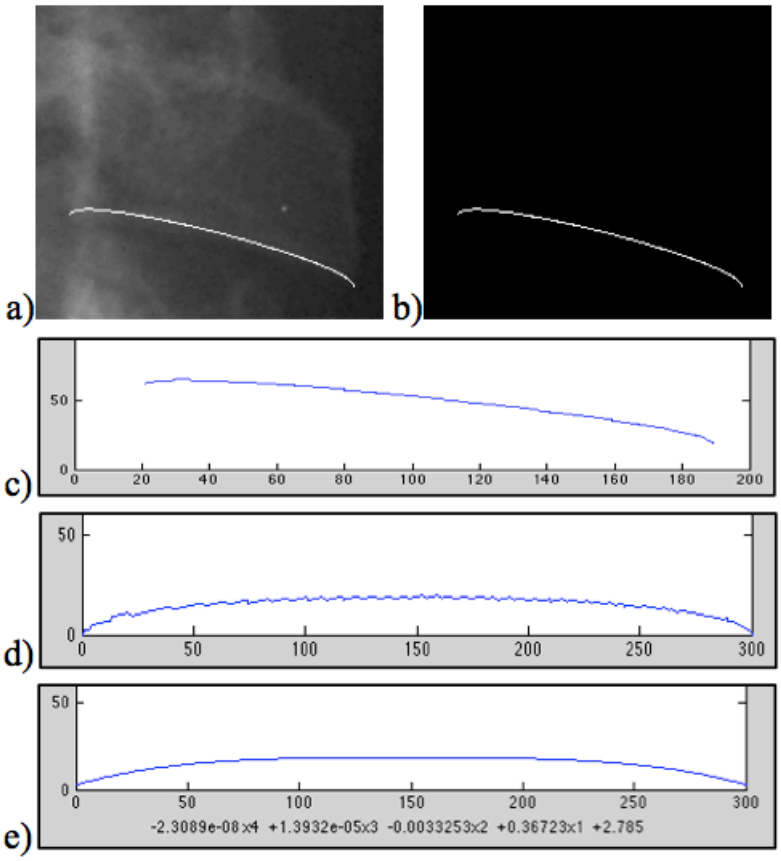


Figura 3.8: Demonstração dos processos computacionais:
(a) demarcação da concavidade da C3; (b) binarização; (c) extração de características;
(d) parametrização (rotação, escala e translação); (e) aproximação e extração do polinômio.
Fonte: Moraes et al. (2012b, p. 1128).

Conforme apresentado, ao final do processamento acima é extraído o polinômio (equação 3.1) que pode ser utilizado direta ou indiretamente em métodos de estimação de idade óssea. Aplicações diretas ocorrem quando os coeficientes do polinômio são utilizados como entrada para algum método, em contrapartida, aplicações indiretas ocorrem quando o polinômio recebe alguma transformação e/ou ajuste antes de ser utilizado por métodos de estimação.

Como proposta para o uso indireto foram investigadas duas características: no primeiro momento calculou-se a área da concavidade da C3 (AR); e no segundo momento buscou-se identificar a maior altura desta concavidade (MA). A seguir ambos serão mais detalhados e exemplificados.

Para extrair a área baseada no polinômio foi aplicada uma integral definida. Para mostrar este processo seguem a equação 3.2 e a Figura 3.9.

$$AR = \int_a^b f(x)\, dx \ , \tag{3.2}$$

sendo *f(x)* os coeficientes do polinômio (equação 3.1), e *a* e *b* são os limites (inferior e superior), que para o domínio utilizado este valores são 0 e 300 respectivamente, devido a parametrização realizada na fase de extração de características. Portanto *AR* retorna a área abaixo da curva do polinômio.

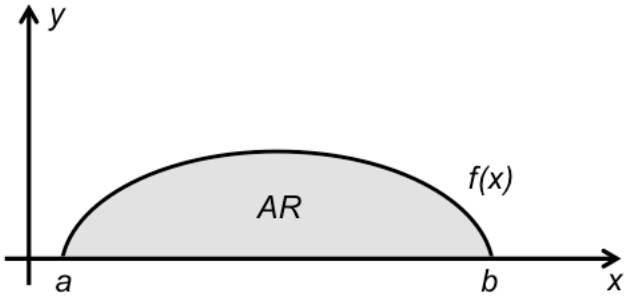


Figura 3.9: Representação da integral para identificar a área abaixo da curva do polinômio.

Para extrair a maior altura basta aplicar uma derivada no polinômio e igualar a zero pra encontrar as raízes, obtendo assim os pontos críticos. Por fim, dentre os pontos críticos é identificado o ponto de máximo local do polinômio, este último representa a maior altura da concavidade. Para mostrar este processo, seguem a equação 3.3 e a Figura 3.10.

$$MA = f'(x) = 0 \qquad \text{ou} \qquad MA = \frac{df}{dx}(x) = 0 \ , \tag{3.3}$$

em que *f'(x)* é a derivada dos coeficientes do polinômio (equação 3.1) e *MA* retorna a maior altura da curva do polinômio.

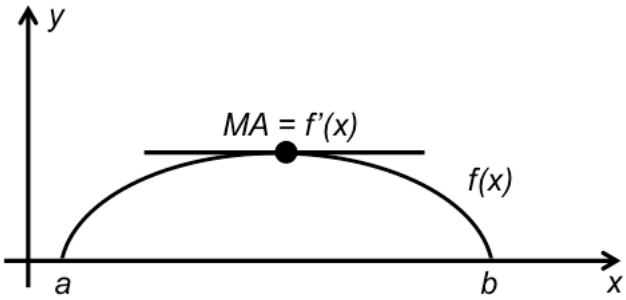


Figura 3.10: Representação da derivada para identificar a maior altura do polinômio.

A fase de extração de característica apresentou três opções de parâmetros em relação a concavidade da C3, são eles: o polinômio, a área ou a máxima altura.

A área da concavidade assim como o polinômio são características inéditas, além de torna-se inviável ou não trivial a sua extração de forma manual. A maior altura da concavidade não é uma nova informação, entretanto existe subjetividade nas metodologias anteriores. Em contrapartida, este trabalho propõe a extração exata da maior altura, pois a mesma foi calculada por meio de métodos matemáticos.

3.5. Estimação de idade óssea

Após a extração das características o trabalho objetiva a estimação de idade óssea. Conforme mencionado anteriormente, um novo método para a estimação de idade óssea será proposto baseado no polinômio da concavidade da C3. Diversos estudos para combinações de características foram desenvolvidas e testadas, abaixo serão apresentadas as mais relevantes.

O primeiro estudo foi apresentado no trabalho de Moraes et al. (2012b) e resume-se em obter o polinômio da concavidade da C3 de todas as imagens da base, posteriormente, calcular o polinômio médio para cada faixa etária e gênero, por meio das imagens armazenadas como referência. Para melhor compreensão, a Figura 3.11 ilustra o comportamento dos polinômios médios (em *pixels*) para o sexo feminino, com faixa etária de 8 a 13,5 anos e intervalos de 0,5 anos, extraídos da base de dados longitudinal.

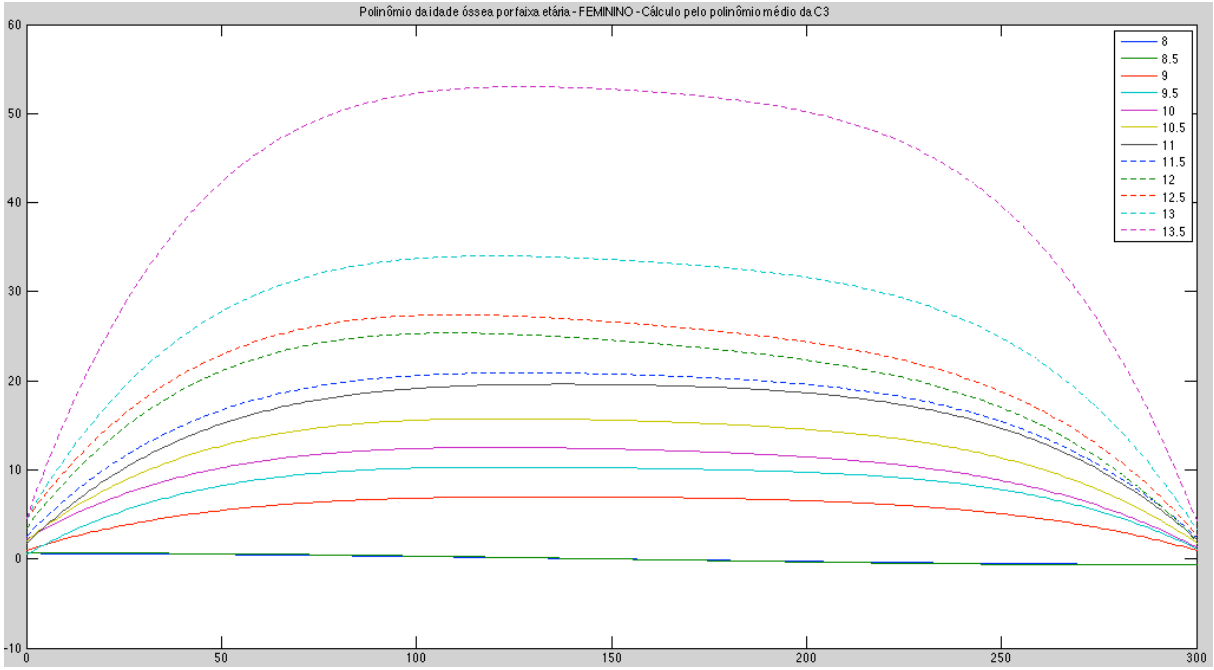


Figura 3.11: Comportamento do polinômio médio para cada faixa etária (de 8 a 13,5 anos) do sexo feminino.
Fonte: Moraes et al. (2012b, p. 1127).

Para comparar o polinômio que se deseja utilizar para estimar a idade óssea com os polinômios médios, os cálculos foram realizados pelo Erro Quadrático Médio. Para a amostra analisa é atribuída a idade óssea representada pelo polinômio médio que proporcionou o menor erro.

Após observar tal comportamento, um segundo estudo foi proposto por Moraes, Casati e Rodrigues (2013), que utilizaram de forma direta os coeficientes do polinômio da concavidade da C3 (CP) como entrada para uma rede neural artificial (RNA), identificando automaticamente o comportamento da concavidade e correlacionando o mesmo com a idade óssea. A justificativa para o uso de RNA foi que ao aplicar métodos clássicos de predição, como regressão linear múltipla (RLM), os resultados não foram tão expressivos quanto os esperados. Esses valores serão apresentados e discutidos no capítulo de resultados.

Por tratar-se de um problema de aproximação de função, a arquitetura da RNA selecionada foi a perceptron multicamadas (PMC), pois trata-se de uma rede com arquitetura *feedforward* de camadas múltiplas. A escolha foi baseada em sua capacidade para mapear o comportamento dos processos por meio de exemplos (treinamento), com excelente eficiência em problemas de aproximação universal de

funções. A seguir são descritos os detalhes da arquitetura e topologia da rede projetada.

Na literatura já foi demonstrado que a topologia de redes para problemas de aproximação universal de funções pode ser constituída de apenas uma camada neural escondida, sendo capaz de mapear qualquer função contínua no espaço das funções reais, desde que para a função de ativação sejam adotadas funções contínuas e limitadas, como por exemplo a função logística e tangente hiperbólica (SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2010).

Para mapear os coeficientes do polinómio de 4º grau (equação 3.1), cada coeficiente foi utilizado como um sinal de entrada da RNA, assim, a topologia da rede neural contou com cinco entradas, x_1 a x_5. As entradas foram normalizados pelo valor máximo de cada coeficiente considerando-se todas as amostras.

A camada neural escondida variou de 1 a 20 neurônios, assim, foram possíveis vinte diferentes topologias a serem testadas. A função de ativação utilizada foi a tangente hiperbólica. Na camada de saída foi utilizado apenas um neurônio, com função de ativação linear. A saída da rede é a idade óssea, também normalizada, calculada a partir da média dos laudos realizados por dois métodos, um carpal (TW3) e o outro cervical (Caldas et al. de 2007), que será denominado "média dos laudos". Os pesos sinápticos e os bias foram iniciados com números aleatórios entre 0 e 1. A arquitetura e topologias são representadas na Figura 3.12.

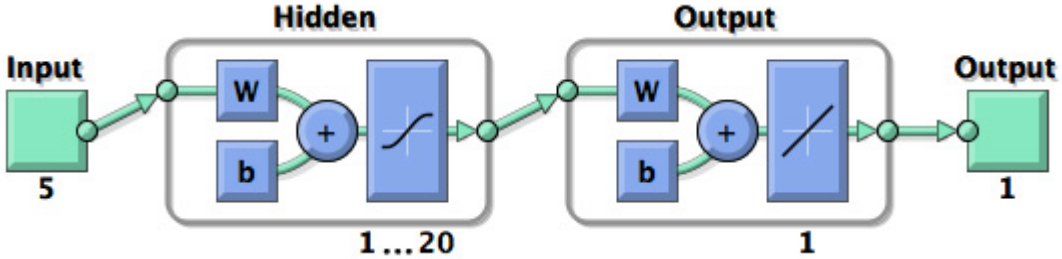


Figura 3.12: Arquitetura PMC e topologias testadas.
Fonte: Adaptada do *toolbox* de RNA do MATLAB.

A etapa de treinamento do PMC foi supervisionada. Isso significa que, para cada amostra de entrada é necessária uma saída desejada. O algoritmo utilizado para o treinamento *backpropagation* foi a otimização de Levenberg-Marquardt (HAGAN; MENHAJ, 1994), função "trainlm" do MATLAB. O valor para o parâmetro taxa de aprendizagem foi definido como 0,01, a precisão requerida foi de 10^{-5} e o limite de iterações, épocas, foi de 50.

As amostras utilizadas no processo de treinamento foram divididas em três conjuntos de forma aleatória. O primeiro foi o conjunto de treinamento com 70% das amostras. O segundo, com 15% das amostras, foi o conjunto de validação, que o algoritmo de Levenberg-Marquardt utiliza para a análise de validação e critério de parada. O último foi o conjunto de teste, também com 15% das amostras, porém as mesmas não foram utilizadas no processo de treinamento.

Um algoritmo automatizado foi implementado para executar 20 treinamentos para cada uma das 20 topologias candidatas (que variaram de 1 a 20 neurônios na camada escondida, como mostrado na Figura 3.12). Portanto, a cada execução desta rotina foram realizados um total de 400 treinamentos.

Para cada um dos 400 treinamentos foram armazenados diversos parâmetros: erro quadrático médio (EQM), erro relativo médio (ERM), erro entre cada época (gradiente), correlação (r), número de neurônios, número de épocas dentre outros. Além de armazenar esses parâmetros para cada treinamento, foi calculado também a média de todos os treinamentos para cada topologia. No final da rotina ao analisar todos os parâmetros disponíveis, a correlação foi o parâmetro que apresentou variações mais significativas. Portanto, o critério de seleção da melhor topologia foi o maior valor de correlação (r_{max}), aplicado apenas no conjunto de testes das amostras. A seleção é mais detalhada e exemplificada no capítulo de resultados.

Aproveitando este segundo estudo, entretanto utilizando de forma indireta os coeficientes do polinômio, foi calculado a área e a maior altura da concavidade da C3. Estes parâmetros também foram apresentados como entrada para esta RNA, identificando automaticamente o comportamento dos parâmetros e correlacionando os mesmos com a idade óssea.

3.6. Análise dos dados

Para a fase de processamento de imagem foi aplicada uma avaliação de classificadores objetivando expressar a precisão, exatidão e o erro da segmentação da imagem.

Para a fase de estimação, considerando ambas idades ósseas, média dos laudos (fornecidas com a base de dados) e estimadas pelo método proposto, após verificada a existência de distribuição normal nas amostras foram calculados os seguintes parâmetros: média, desvio padrão, variância, *T-Student* (*p*-valor), coeficiente de correlação de Pearson (r), análise de regressão linear (diagrama de dispersão, equação de regressão e coeficiente de determinação (R^2), concordância (taxa de acerto) e erro médio absoluto (EMA).

3.7. Considerações finais

O Capítulo 3 apresentou a metodologia deste trabalho para a segmentação das imagens de telerradiografias em norma lateral, abordando as técnicas utilizadas para as fases de processamento digital de imagens: aquisição de imagens, pré-processamento, segmentação e extração de características. No final foi apresentado o método de estimação de idade óssea e as características utilizadas no trabalho, assim como os parâmetros para a análise dos resultados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

De acordo com a metodologia proposta para este trabalho, abaixo serão apresentados os resultados para as duas fases, a primeira responsável pelo processamento de imagem e a segunda pela estimação de idade óssea.

4.1. Processamento de imagem

Apesar do alto grau de dificuldade devido ao baixo contraste entre ossos, tecidos, músculos, e também a sobreposição dos ossos, os algoritmos desenvolvidos mostraram-se encorajadores.

Para entender melhor os resultados exige-se uma análise mais cuidadosa, para isto, foram aplicados métodos de avaliação de classificadores para três imagens, nomeadas como A, B e C. Para simplificar as nomenclaturas, as vértebras C2, C3 e C4 serão chamadas de osso e o restante da região chamado de fundo.

As contingências são adotadas como:

- **VP (verdadeiro positivo):** o pixel de entrada é osso, e o classificador o classifica como osso.
- **VN (verdadeiro negativo):** o pixel de entrada é fundo, e o classificador o classifica como fundo.
- **FP (falso positivo):** o pixel de entrada é fundo, e o classificador o classifica como osso.
- **FN (falso negativo):** o pixel de entrada é osso, e o classificador o classifica como fundo.

Como métricas são utilizados os parâmetros:

- **Precisão:** $$\frac{VP}{VP+FP}, \tag{4.1}$$
- **Exatidão:** $$\frac{VP+VN}{VP+FN+FP+VN}, \tag{4.2}$$

- **Erro:** $$\frac{FP+FN}{VP+FN+FP+VN}, \quad (4.3)$$

Para utilizar esse método de avaliação é necessário definir uma imagem de referência, que represente a imagem ideal a qual se deseja alcançar como resultado. Neste caso foram criadas imagens sintéticas baseadas nas imagens originais (A, B e C), sendo elas binárias, com valor 1 (cor branca) para os ossos e 0 (cor preta) para o fundo.

Para comparar os resultados por meio do método de avaliação de classificadores escolhido, seguem imagens e tabelas comparativas. Para a primeira imagem, A, segue abaixo a Figura 4.1 e a Tabela 4.1.

Figura 4.1: Para imagem A: (a) original; (b) ideal; (c) segmentada; (d) analisada. Falso positivo (verde) e falso negativo (vermelho).

Tabela 4.1: Valores de contingências e métricas encontrados para Figura 4.1d.

Contingências	**Qtde pixels***
Osso	54729
Fundo	120068
Falso Positivo	13622
Falso Negativo	1760
Métricas	**(%)**
Precisão	80,07
Exatidão	91,91
Erro	8,09

* Resolução: 300 dpi

Conforme observado na Tabela 4.1 obteve-se 80,07% de precisão, 91,91% de exatidão e 8,09% de erro. Para os parâmetros de exatidão e erro os valores mostram-se significativos, pois indicam que a imagem de saída está próxima da imagem ideal. Ao analisar o parâmetro de precisão, pode-se compreender seu valor (80,07%), pois na imagem analisada (Figura 4.1d) estão presentes estruturas indesejadas (falsos positivos), diferentes das encontradas na imagem ideal (Figura 4.1b), que aparecem como conexões entre as cervicais. Essas estruturas não pertencem às ROIs e sim a segmentos de ossos da parte posterior da cervical.

Os resultados encontrados para a segunda imagem, B, podem ser observados na Figura 4.2 e Tabela 4.2.

Figura 4.2: Para imagem B: (a) original; (b) ideal; (c) segmentada; (d) analisada. Falso positivo (verde) e falso negativo (vermelho).

Tabela 4.2: Valores de contingências e métricas encontrados para Figura 4.2d.

Contingências	**Qtde pixels***
Osso	87401
Fundo	165785
Falso Positivo	16123
Falso Negativo	5523
Métricas	**(%)**
Precisão	84,43
Exatidão	92,12
Erro	7,88

* Resolução: 300 dpi

Ao analisar a Tabela 4.2, verifica-se que os valores dos parâmetros de exatidão e erro quando comparados com os mesmos parâmetros encontrados na Tabela 4.1 são próximos, mesmo tratando-se de duas imagens com morfologias e ângulos diferentes. O parâmetro de precisão aumentou de 80,07% para 84,43%. Isto indica que menos segmentos de ossos da parte posterior das cervicais foram identificados como ROI.

Os resultados encontrados para a terceira imagem, C, podem ser observados na Figura 4.3 e Tabela 4.3.

Figura 4.3: Para imagem C: (a) original; (b) ideal; (c) segmentada; (d) analisada. Falso positivo (verde) e falso negativo (vermelho).

Tabela 4.3: Valores de contingências e métricas encontrados para Figura 4.3d.

Contingências	**Qtde pixels***
Osso	56625
Fundo	98075
Falso Positivo	11869
Falso Negativo	3335
Métricas	**(%)**
Precisão	82,67
Exatidão	91,05
Erro	8,95

* Resolução: 300 dpi

Analisando a Tabela 4.3, verifica-se que novamente os valores dos parâmetros de exatidão e erro são próximos quando comparados com a Tabela 4.1 e a Tabela 4.2, considerando ainda que se tratam de imagens com morfologias e ângulos diferentes. A precisão ficou na média se comparado novamente com a Tabela 4.1 e a Tabela 4.2.

Ao observar os resultados das métricas encontrados nas tabelas acima, identificou-se que seus valores foram muito próximos. Por tal motivo, podemos considerar como resultado final a média dos parâmetros das métricas, aproximando assim tais valores conforme indicado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Valores da média das métricas encontradas nas tabelas acima.

Média das Métricas	**(%)**
Precisão	82,39
Exatidão	91,70
Erro	8,30

Baseado em Gonzalez e Woods (2008) diversas outras técnicas de processamento de imagem foram implementadas e testadas individualmente ou combinadas entre si, porém os resultados não foram expressivos ao ponto de serem detalhados neste trabalho. Entretanto, é de grande valia citar tais técnicas para que futuras pesquisas possam buscar soluções diferentes. São elas: espaço de cores (HSI, RGB e CMY); filtros passa-alta (Log, Sobel, Prewitt, Roberts, Zerocross, Canny); filtros passa-baixa (média, mediana); filtro gamma; filtro de difusão anisotrópico; filtros manuais no domínio da frequência; filtro homomórfico; equalização por histograma; alargamento de contrastes; fatiamento dos níveis de cinza; fatiamento de planos de bits; correção de iluminação não uniforme; perfil radiométrico por linha e por máscara; watershed; morfologia matemática (erosão, dilatação, abertura e fechamento); crescimento por região; contornos ativos (snakes); entropia, LBP (Local Binary Pattern), LFP-s (Local Fuzzy Pattern-sigmoid), LFP-t (Local Fuzzy Pattern-triangular); RNA (perceptron simples e PMC) entre outros. Portanto, por meio de técnicas clássicas fica evidenciado que a segmentação deste tipo de imagem não é uma tarefa trivial.

4.2. Estimação de idade óssea

Inicialmente serão apresentados os resultados referentes a aplicação de redes neurais, com o objetivo de identificar e validar o comportamento dos polinômios que representam a concavidade da C3. Posteriormente, visando correlacionar este comportamento com a idade óssea cervical, serão apresentados os resultados referentes a estimação de idade óssea baseada nesta característica.

Vale ressaltar que a análise de dados proposta na metodologia será aplicada apenas para a melhor das combinação de características, identificada pela maior correlação para cada procedimento, RNA (toolbox MATLAB) e RLM (Weka).

Incialmente foram testadas as três características do polinômio (CP: coeficientes do polinômio, AR: área e MA: máxima altura). Para o CP foi comprovado no trabalho de Moraes et al. (2012b) a existência de relação de comportamento do polinômio com o aumento da idade. Portanto, abaixo foi investigado a relação entre as características AR e MA com a idade cronológica. Para melhor compreensão, a Figura 4.4 ilustra o comportamento da média da área (em *pixels*) para cada gênero, com faixa etária de 8 a 16 anos, em intervalos anuais, extraídos da base de dados transversal. O mesmo se repete para a Figura 4.5, que ilustra o comportamento da média da maior altura (em *pixels*).

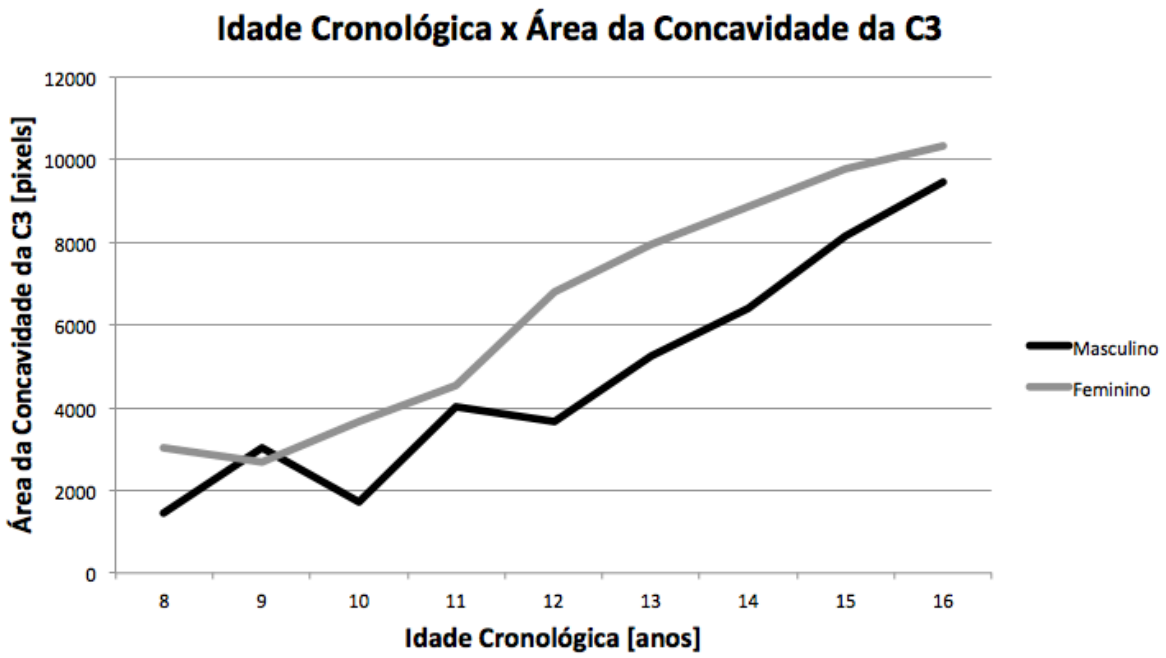


Figura 4.4: Relação entre idade cronológica e área da concavidade para ambos os gêneros.

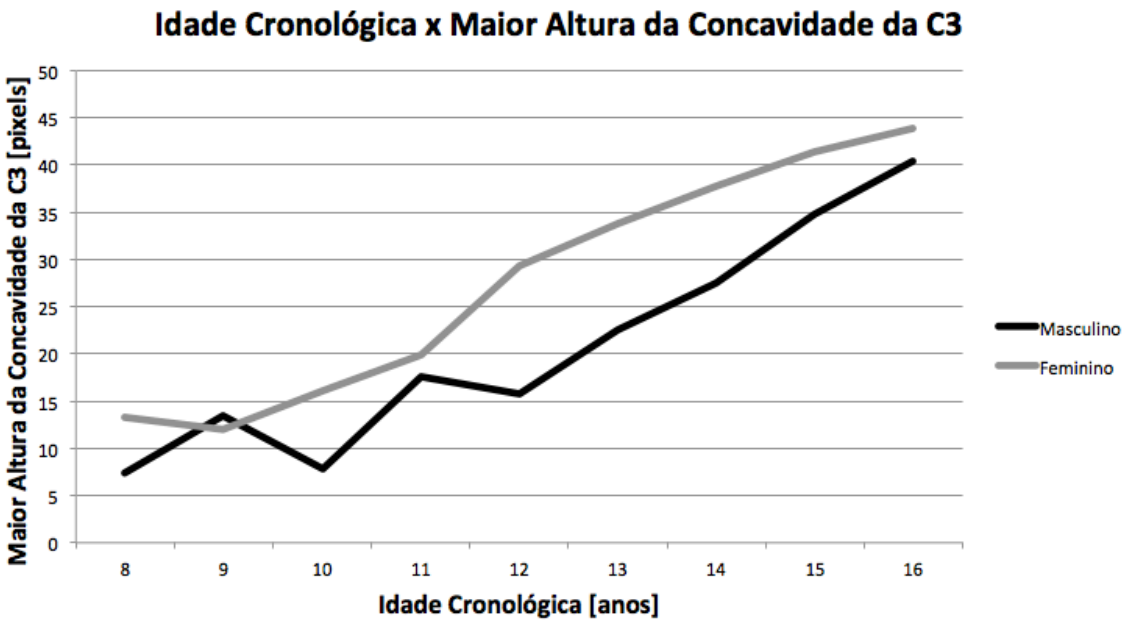


Figura 4.5: Relação entre idade cronológica e maior altura da concavidade da C3 para ambos os gêneros.

Analisando as figuras uma informação importante foi identificada, que é a relação entre AR e MA apresentar comportamento relativamente constante. Entretanto como pode ser observado, as mesmas possuem escalas diferentes para quantidade de pixels. Para investigar essa informação primeiramente os dados foram normalizados para posteriormente ser calculado a razão AR/MA (Figura 4.6). Para hipótese ser válida, esta razão tem que ser igual ou muito próxima de 1.

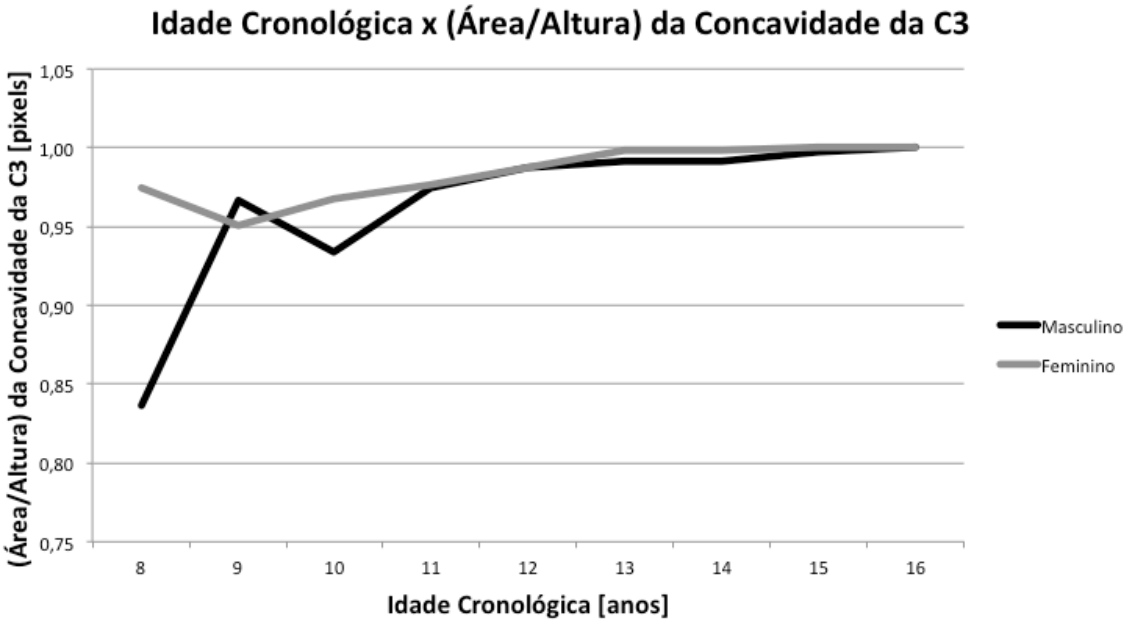


Figura 4.6: Relação entre idade cronológica e razão (AR/MA) para ambos os gêneros.

Como pôde ser observado na Figura 4.6, a partir de 11 anos esta razão tem comportamento bastante constante, indicando que houve crescimento ordenado dessas características.

Considerando que as três características (CP, AR e MA) possuem relação com o aumento da idade, a Tabela 4.5 exibe os valores de correlação para as características e logo abaixo os mesmo são discutidos.

Tabela 4.5: Valor de r de cada característica e procedimento para cada gênero.

Características	Masculino		Feminino	
	RNA*	RLM*	RNA*	RLM*
CP	0,8914	0,7299	0,8921	0,7230
AR	0,8853	0,7160	0,8867	0,7400
MA	0,8844	0,7170	0,8810	0,7415

** Valores encontrados para correlação (r)*

Para a Tabela 4.5 vale ressaltar duas observações, a primeira é que em todas as análises a RNA mostraram-se superiores a RLM, isto justifica o seu uso neste tipo de problema. E a segunda observação é que os coeficientes do polinômio mostraram maior correlação para ambos os gêneros do que as demais características, área e maior altura. Observa-se ainda que a área e maior altura atingiram valores muito próximos, ou seja, talvez as informações podem ser redundantes devido a hipótese citada acima, de possuírem normalidade na proporção do crescimento. Portanto, foi investigado se as combinações entre elas e o polinômio aumentam a correlação. Os resultados são apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Valor de r para combinação das características do polinômio para cada gênero.

Características	Masculino		Feminino	
	RNA*	RLM*	RNA*	RLM*
CP e AR	0,8961	0,7303	0,8839	0,7080
CP e MA	0,8840	0,7298	0,8607	0,7174
AR e MA	0,8994	0,7143	0,8781	0,7302
CP, AR e MA	0,8876	0,7302	0,8847	0,7063

** Valores encontrados para correlação (r)*

Como pode ser observado na Tabela 4.6, novamente os valores da RLM são inferiores a RNA. Observa-se também que nenhuma das combinações para ambos os gêneros foram maiores o suficiente para justificar o seu uso, pois em nenhum momento atingiram valores superiores a 0,89, valor este encontrado apenas pela característica CP.

Visando aproveitar a metodologia desenvolvida, decidiu-se investigar o comportamento de outras características já utilizadas na literatura, inicialmente de forma individual e posteriormente combinadas entre si e com o polinômio. As características exploradas foram: altura anterior da C3 (AH3); altura posterior da C3 (PH3); altura média da C3 (H3) e largura ântero-posterior da C3 (AP3). As medidas das mesmas foram fornecidas junto com a base de dados transversal.

Após extrair as medidas de tais características da base de dados, verificou-se a relação entre as mesmas e a idade cronológica, calculadas e agrupadas pela média da idade cronológica em intervalos anuais. A Figura 4.7 e a Figura 4.8 exibem esta relação para o sexo masculino e feminino respectivamente.

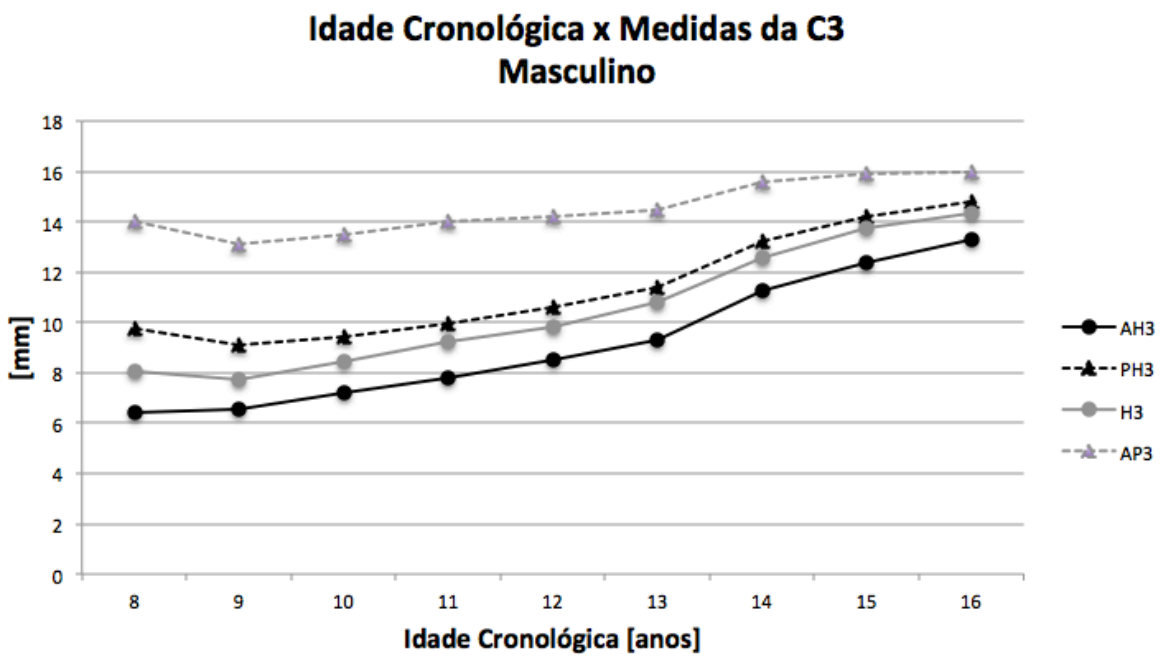


Figura 4.7: Relação entre idade cronológica e medidas para o sexo masculino.

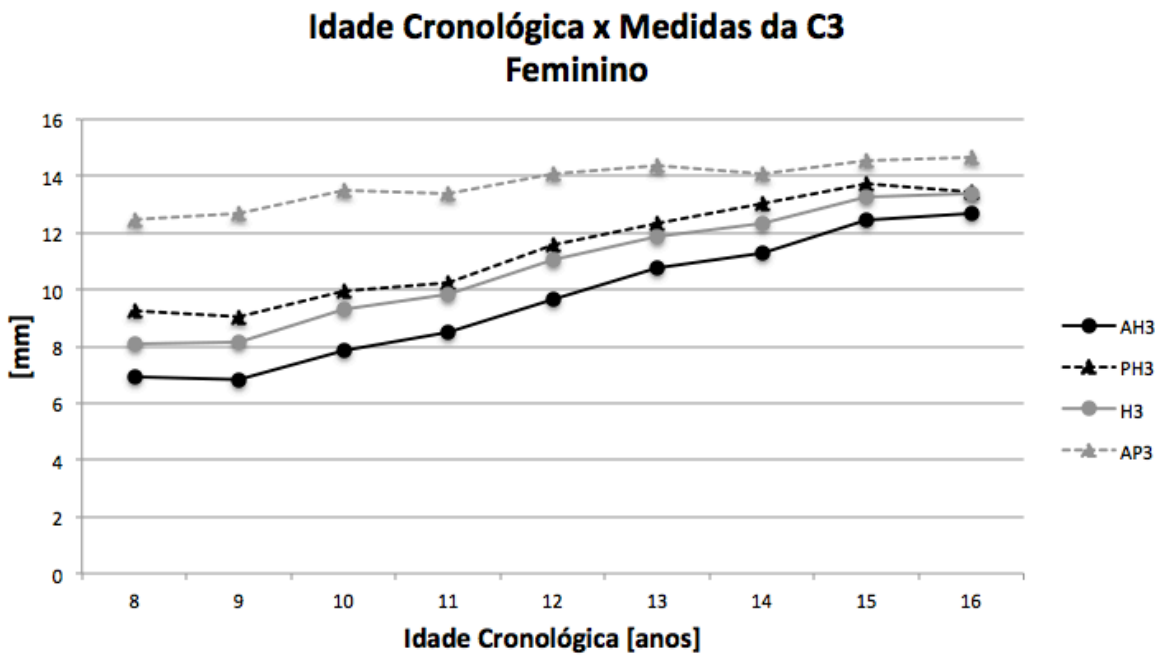


Figura 4.8: Relação entre idade cronológica e medidas para o sexo feminino.

Como pode ser observado nas figuras anteriores (Figura 4.7 e Figura 4.8), há uma relação crescente no comportamento das medidas com a idade cronológica. Isto permite o uso de tais medidas como entrada para a metodologia proposta. A Tabela 4.7 mostra os valores de correlação encontrados para cada medida, procedimento e gênero.

Tabela 4.7: Valor de r de cada medida e procedimento para cada gênero.

Características	Masculino		Feminino	
	RNA*	RLM*	RNA*	RLM*
AH3	0,9623	0,9381	0,9580	0,9173
AP3	0,8383	0,5267	0,6238	0,4726
H3	0,9644	0,9085	0,9414	0,8662
PH3	0,9285	0,8412	0,9129	0,7871

** Valores encontrados para correlação (r)*

Ao analisar a Tabela 4.7, as características que apresentaram maior correlação foi a AH3 e H3, com valores em torno de 0,96. Porém, pelo motivo das duas se tratarem de altura, optou-se selecionar uma única medida. Portanto, a que proporcionou maior correlação considerando os dois gêneros foi a AH3.

Apesar do alto valor de correlação encontrado (0,96), investigou-se combinações e razões entre as medidas e também a inclusão do polinômio em tais combinações. Para as mais relevantes são apresentados os comportamentos (Figura 4.9) e os valores de correlação obtidos (Tabela 4.8).

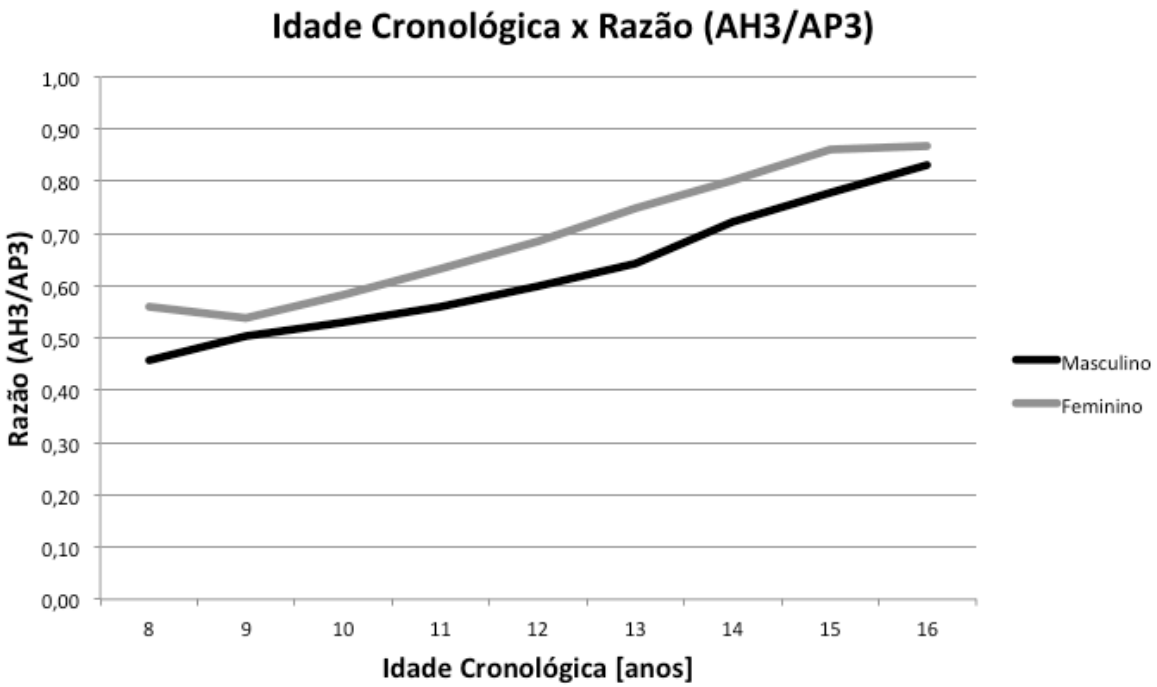


Figura 4.9: Relação entre idade cronológica e razão (AH3/AP3) para ambos os gêneros.

Conforme observado na Figura 4.9, também houve uma relação crescente no comportamento das medidas com a idade cronológica, permitindo assim o seu uso.

Tabela 4.8: Valor de r para combinação das características e procedimento para cada gênero.

Características	Masculino		Feminino	
	RNA*	RLM*	RNA*	RLM*
CP e AH3	0,9707	0,9411	0,9625	0,9180
AH3/AP3	0,9837	0,9550	0,9586	0,9389
AH3/AP3 e CP	0,9831	0,9504	0,9632	0,9344

** Valores encontrados para correlação (r)*

Ao analisar a Tabela 4.8, apesar dos altos valores da RLM (média em torno de 0,93), novamente constata-se superioridade para o procedimento de RNA (média em torno de 0,97). Além disto, outras análises podem ser observadas, e a principal é

que o CP contribuí para o aumento da correlação. Isto pode ser comprovado se observarmos que para a combinação de “CP e AH3”, o valor obtido foi superior quando comparado apenas a AH3 (Tabela 4.7). O mesmo se repete se confrontarmos o AH3/AP3 com “AH3/AP e CP”, que para o sexo masculino se mantém, em contrapartida, para o feminino houve um ganho.

Portanto, pode-se concluir que o polinômio apesar de ser uma nova característica, pode contribuir para o aumento da precisão da estimação da idade óssea em métodos que utilizam outras características dimensionais. Isso indica que não há redundância de informações entre as propriedades do CP e das outras medidas.

Considerando tais observações, a análise de dados foi aplicada apenas para os resultados referentes a RNA que recebe como entrada a combinação “AH3/AP3 e CP”. Entretanto, a mesma análise foi aplicada considerando somente o CP visando investigar o poder desta nova característica, e os resultados são apresentados no APÊNDICE A.

Para identificar a melhor topologia de RNA utilizada para cada gênero, foi elaborada a Tabela 4.9. Esta tabela apresenta os valores de r_{max} do melhor treinamento de cada topologia candidata, aplicada apenas no conjunto de teste.

Tabela 4.9: Valor de r_{max} do melhor treinamento de cada topologia para cada gênero.

Topologia*	r_{max} Masculino	r_{max} Feminino
1	0,9708	0,9587
2	0,9696	0,9511
3	0,9626	0,9553
4	0,9772	0,9431
5	0,9620	0,9493
6	0,9690	0,9537
7	0,9762	0,9537
8	0,9632	0,9618
9	**0,9831**	0,9604
10	0,9735	**0,9632**
11	0,9677	0,9606
12	0,9727	0,9491
13	0,9651	0,9595
14	0,9611	0,9478
15	0,9678	0,9563
16	0,9623	0,9461
17	0,9720	0,9454
18	0,9691	0,9492

19	0,9647	0,9580
20	0,9693	0,9538

** Refere-se ao número de neurônios na camada escondida*

Para definir a melhor topologia para cada gênero basta analisar a Tabela 4.9 e localizar o maior r_{max}. Para a melhor topologia de cada sexo a Tabela 4.10 apresenta as informações referentes ao seu respectivo treinamento, e o APÊNDICE B exibe todos resultados (*plots*: estágios de treinamento, histograma de erro, regressão e performance) fornecidos após o treinamento da RNA.

Tabela 4.10: Informações de treinamento referentes a melhor topologia para cada gênero.

Dados de Treinamento	Masculino	Feminino
Nº do melhor treinamento	9	4
Nº de neurônios	9	10
Nº de épocas	9	11
Nº de amostras*	41	48
r*	0,9831	0,9632
ERM*	0,06%	0,31%
EQM*	$3,1x10^{-4}$	$6,1x10^{-4}$
Gradiente	$3,3x10^{-4}$	$1,5x10^{-3}$

** Obtidos considerando apenas o conjunto de teste*

O número do melhor treinamento indica qual dentre os vinte treinamentos realizados pela topologia selecionada apresentou maior valor para correlação. Foi utilizado para recuperar todas as informações do melhor treinamento.

O número de neurônios, 9 e 10, são considerados eficientes pois representam baixo esforço computacional. Um número elevado de neurônios ocasiona *overfitting*, que para o conjunto de treinamento produz EQM pequeno, entretanto em relação ao conjunto de testes é bastante significativo, prejudicando a capacidade de generalização. Em contrapartida, frente à precisão requerida, um número reduzido de neurônios é insuficiente para identificar o comportamento do processo, denominado *underfitting* (SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2010).

O número de épocas está dentro do esperado, 9 e 11, devido ao algoritmo de aprendizagem com otimização de Levenberg-Marquardt, considerado de rápida convergência para problemas de aproximação de função. Para este cenário, um

número de épocas muito elevado indica que o número de neurônios está errado ou que as variáveis de entrada não tem relação com a saída desejada.

O número de amostras, 41 e 48, refere-se a quantidade de amostras disponíveis para cada gênero no conjunto de teste.

As topologias testadas para ambos os gêneros foram capazes de manter o fator de correlação em torno de 0,97, resultado este considerado eficaz, evidenciando que existe forte correlação das saídas desejadas as obtidas.

Os dados referentes aos erros (ERM, EQM e Gradiente), foram extraídos considerando apenas o conjunto de teste, visando identificar a capacidade de generalização. Também estão dentro do previsto para aplicações de RNA para este tipo de arquitetura, em torno de 10^{-4}.

Para melhor apresentação e análise dos resultados visando a estimação de idade óssea, o ideal seria aplicar os testes em grupos diferidos por gêneros e faixas etárias. Entretanto, a quantidade de amostras disponíveis é insuficiente para este tipo de análise, pois além de dividir a base em gêneros, ao utilizar RNA foi necessário dividi-la em conjuntos de treinamento (70%), validação (15%) e teste (15%). Sendo aplicado neste último conjunto as métricas de análise dos dados, dispondo de 89 amostras (41 do sexo masculino e 48 do feminino).

Portanto, os resultados serão apresentados com base nas amostras que não foram utilizadas para o treinamento da metodologia, confrontando as idades ósseas da base (média dos laudos) com as obtidas pelo método proposto, considerando todas as faixas etárias para cada gênero. A Tabela 4.11 apresenta os valores em anos referente aos parâmetros de média, desvio padrão, variância e *T-Student* (*p*-valor), separados por gênero.

Tabela 4.11: Parâmetros (média, desvio padrão, variância e *T-Student)* para a média dos laudos versus a metodologia proposta para cada gênero.

Parâmetros	**Masculino**		**Feminino**	
	Laudos	**Proposto**	**Laudos**	**Proposto**
Média	12,41	12,37	12,56	12,55
Desvio Padrão	2,07	1,91	2,09	1,98
Variância	4,30	3,63	4,35	3,91
T-Student	p = 0,4768		p = 0,8633	

Os parâmetros apresentados na Tabela 4.11 mostram que as idades estimadas pela metodologia proposta e pela média dos laudos estão próximas. Isso pode ser comprovado observando a pequena diferença entre os parâmetros de média (masculino: 0,04 anos; feminino: 0,01 anos) e desvio padrão (masculino: 0,17 anos; feminino: 0,11 anos). A diferença da variância (masculino: 0,67 anos; feminino: 0,44 anos) apesar de apresentar valores um pouco mais altos, deve ser considerado que estes valores são afetados pela variação de idades entre 9 e 16 anos, ou seja, esses valores seriam refinados caso a análise fosse realizada por faixa etária de forma anual. Aplicando o *T-Student* com nível de significância de 5%, obteve-se os valores de *p*-valor (masculino: 0,4768; feminino: 0,8633). Os valores obtidos ($p > 0,05$) indicam que não existem diferenças estatisticamente significativas entre as idades ósseas propostas e esperadas.

Para ilustrar o comportamento dos parâmetros acima, foi gerado um gráfico que indica a correlação entre as idades ósseas das médias dos laudos e as estimadas pelo método proposto, referente ao sexo masculino (Figura 4.10) e sexo feminino (Figura 4.11). Para a análise da correlação entre ambos utilizou-se o coeficiente de correlação de Pearson.

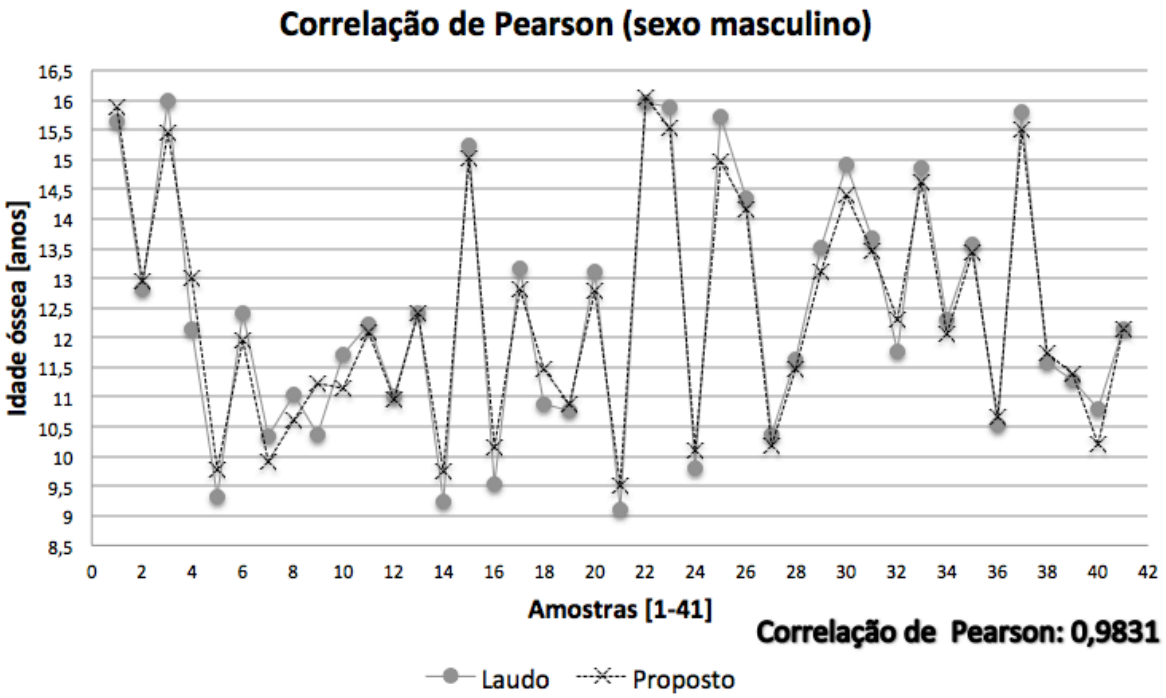


Figura 4.10: Correlação de Pearson das idades ósseas entre as médias dos laudos e o método proposto para o sexo masculino.

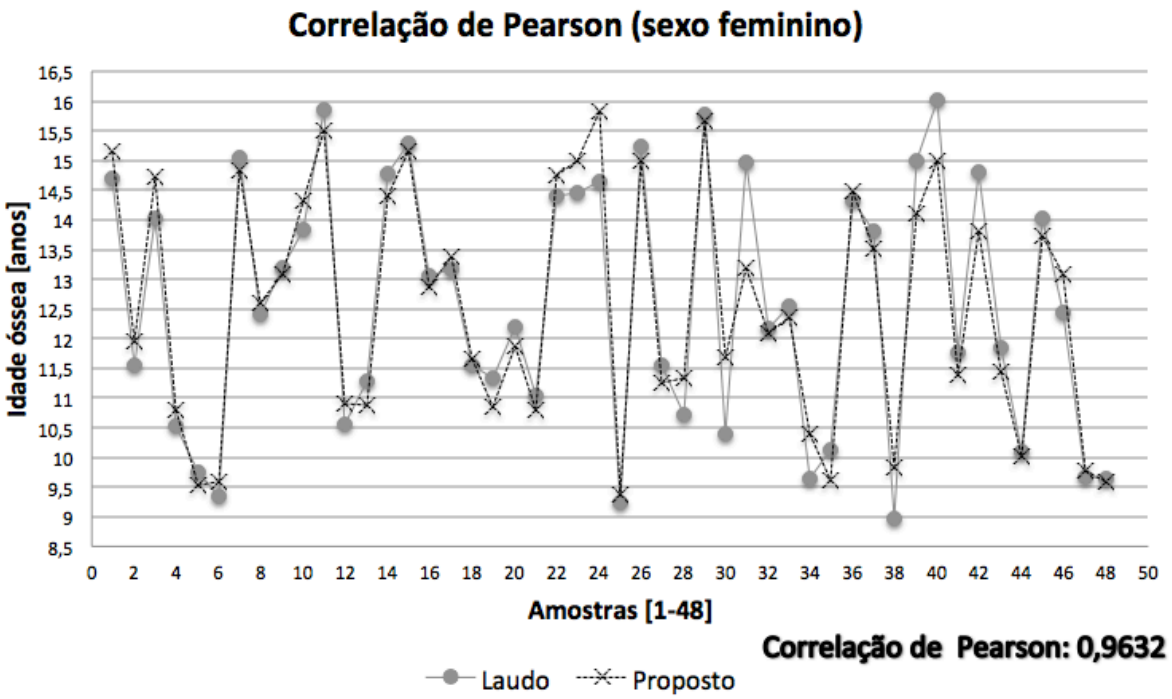


Figura 4.11: Correlação de Pearson das idades ósseas entre as médias dos laudos e o método proposto para o sexo feminino.

Analisando os gráficos de correlação (Figura 4.10 e Figura 4.11), observa-se que as idades estimadas também resultaram muito próximas da média dos laudos. Os valores obtidos pelo coeficiente de correlação de Pearson (masculino: 0,9831; feminino: 0,9632) são considerados como uma correlação forte e positiva.

Apesar dos resultados apresentarem alta correlação, os mesmos foram analisados por regressão linear (masculino: Figura 4.12; feminino: Figura 4.13). Esta análise permite observar o diagrama de dispersão, a reta ajustada pela equação de regressão linear e o coeficiente de determinação R^2.

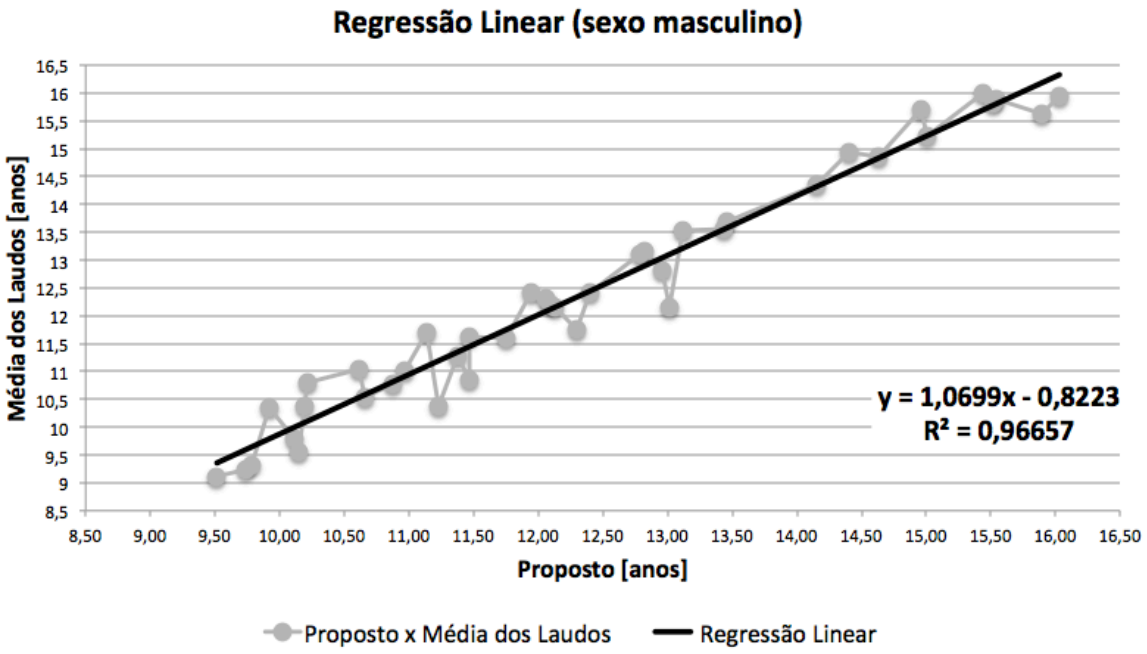


Figura 4.12: Diagrama de dispersão e regressão linear para o sexo masculino.

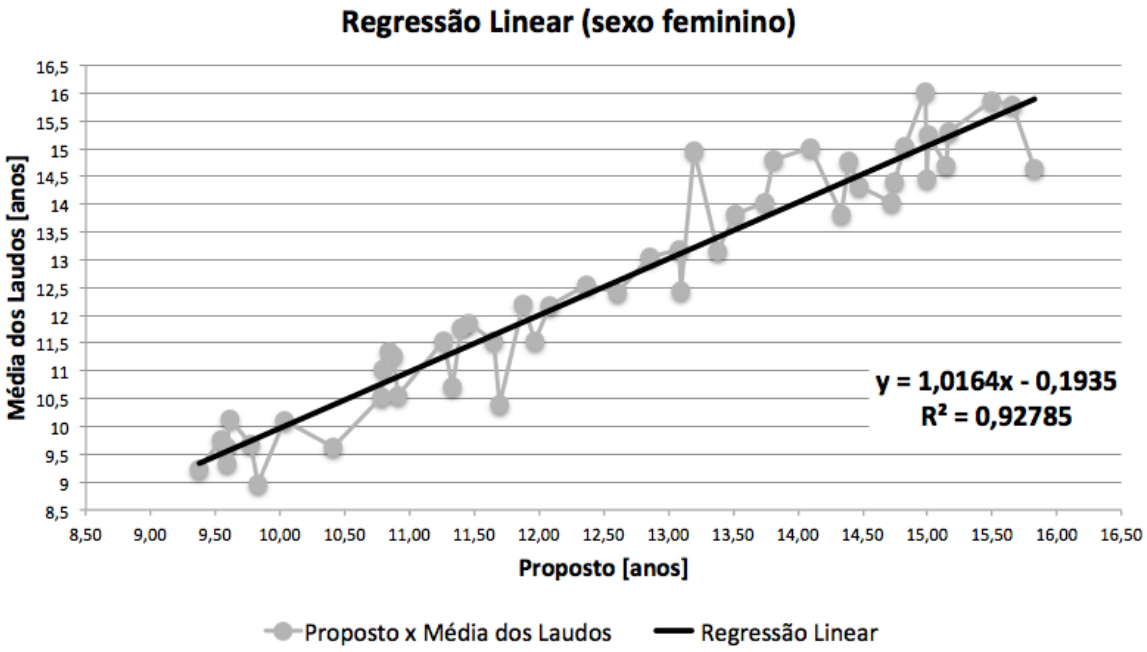


Figura 4.13: Diagrama de dispersão e regressão linear para o sexo feminino.

A partir dos diagramas de dispersão, Figura 4.12 e Figura 4.13, foi encontrada a equação de regressão linear (representada pela reta), que indica o cenário ideal para 100% de coincidência entre a média dos laudos e o método proposto, ou seja, se fossem estimadas corretamente todas as idades sem considerar nenhum erro. Portanto esta equação pode ser utilizada como fator de correção. Os valores encontrados para o coeficiente de determinação R^2 (masculino: 0,9666; feminino:

0,9279) indicam que mais de 90% das idades estimadas estão cobertas pela reta de regressão, ou seja, as idades estimadas coincidem com a média dos laudos.

Para expressar a precisão da metodologia proposta visando a aplicação em estimação de idade óssea, são apresentados na Tabela 4.12 os resultados de concordância (taxa de acerto em %), calculadas a partir do desvio padrão em intervalos arredondados de 0,5 anos de forma individual, ou seja, analisando uma amostra por vez e não o conjunto de teste como um todo.

Tabela 4.12: Resultados de concordância do método proposto para cada gênero.

Desvio padrão*	Masculino	Feminino
0	41,46%	37,50%
0,5	92,68%	83,33%
1	100%	95,83%
1,5	100%	97,92%
2	100%	100%

** Valores expressos em anos*

A Tabela 4.12 apresentou os valores para concordância variando a tolerância de erro de 0 a 2 anos. Os valores aceitáveis de acordo com os métodos clássicos permitem desvios de até no máximo 1 ano para as aplicações clínicas, dependendo da faixa etária em análise. Considerando esta informação, a taxa de acerto foi de 100% para o sexo masculino e 95,83% para o feminino. Portanto, respeitando tal tolerância a metodologia proposta mostrou-se eficiente e aplicável clinicamente.

Para expressar o erro da metodologia aplicada em estimação de idade óssea, são apresentados na Tabela 4.13 os resultados de EMA. Porém, diferentemente da concordância, o EMA analisa o conjunto de teste como um todo ao invés de forma individual, ou seja, é um único valor que expressa a contribuição de todas as amostras do conjunto.

Tabela 4.13: Resultados do EMA para o método proposto para cada gênero.

Erro	Masculino	Feminino
EMA*	0,34	0,43

** Valores expressos em anos*

A análise da metodologia proposta torna-se mais robusta quando além de considerar a precisão, citada anteriormente, considera-se também o erro. Logo, na Tabela 4.13 foram apresentados os resultados de EMA (masculino: 034; feminino: 0,43), que representam a média dos erros absolutos na estimação das idades ósseas pelo método proposto. Estes valores ratificam a metodologia proposta, pois respeitam a tolerância dos métodos clássicos citados acima.

4.3. Considerações finais

Neste capítulo foram apresentados os resultados referentes a metodologia proposta divididos em duas fases, processamento de imagem e estimação de idade óssea. Para a primeira fase foi aplicada uma avaliação de classificadores objetivando expressar a precisão, exatidão e o erro da segmentação da imagem. Para a segunda fase foram extraídos diversos parâmetros estatísticos, visando identificar se as idades estimadas estavam dentro da faixa considerada aceita cientificamente e clinicamente.

5. CONCLUSÕES

De acordo com a metodologia proposta para este trabalho, abaixo são apresentadas as conclusões para as duas fases, a primeira responsável pelo processamento de imagem e a segunda pela estimação de idade óssea. No final, são apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

5.1. Processamento de imagem

No Capítulo 3 foi apresentada uma metodologia baseada em técnicas de Processamento Digital de Imagens, que fornece como saída imagens segmentadas das vértebras C2, C3 e C4, obtidas por telerradiografias em norma lateral. Essas imagens de saída servirão de entrada para os algoritmos de extração automática de características, com o objetivo final de estimar a idade óssea de um indivíduo por meio de análise das vértebras cervicais.

Conforme observado nos resultados (Tabela 4.1, Tabela 4.2 e Tabela 4.3), identificou-se que os valores das métricas foram muito próximos, indicando que a metodologia mostra-se eficaz no quesito generalização, ou seja, para diferentes imagens os resultados possuem valores de métricas semelhantes.

Ao analisar a Tabela 4.4, chega-se a conclusão que para os parâmetros de exatidão (91,70%) e erro (8,30%), os valores encontrados podem ser considerados expressivos. Em contrapartida, o valor médio obtido para a precisão (82,39%) foi influenciado pela contribuição dos falsos positivos, que nas imagens analisadas são segmentos de ossos da parte posterior das cervicais. Isto ocorre pois a captura de tecido ósseo em radiografia, que gera imagem 2D, suprime a informação de profundidade, trazendo para o mesmo plano informações não desejadas para a análise.

Conclui-se que a metodologia é eficaz para a segmentação dos ossos das cervicais, entretanto, nas análises de estimação de idade óssea algumas estruturas não devem ser consideradas. Por este motivo outras técnicas devem ser estudadas, aplicadas, testadas e comparadas, visando a remoção dessas estruturas

indesejadas. Quando alcançado este objetivo, será permitido automatizar o processo de estimação da idade óssea pela análise das cervicais, aumentando a precisão e a velocidade quando comparado ao processo convencional que é realizado de forma manual ou semiautomático.

5.2. Estimação de idade óssea

De acordo com a tendência atual que visa aumentar a qualidade de vida de pacientes reduzindo sua exposição à radiações ionizantes, este trabalho apresentou uma nova metodologia que identifica o comportamento da concavidade inferior da C3 e o correlaciona com a idade óssea. Para a representação numérica da concavidade foi extraído o polinômio de 4º grau. O polinômio permitiu ser utilizado de forma direta (coeficientes do polinômio) e indireta (cálculos de: área e máxima altura) em métodos de estimação de idade óssea. Outras características do corpo vertebral da C3, já conhecidas da literatura, foram investigadas individualmente ou por meio de combinações entre si e em conjunto com o polinômio. A melhor combinação foi a “AH3/AP3 e CP”. Portanto esses parâmetros foram utilizados como entradas para uma RNA do tipo PMC.

O uso de RNA para mapear o comportamento da concavidade mostrou-se eficiente para ambos os gêneros, com baixo custo computacional e alta correlação (r em torno de 0,97) entre a saída esperada e obtida. Analisando os erros, os mesmos também podem ser considerados baixos, dentro dos valores esperados para as aplicações de RNA, onde considerando a média para ambos os gêneros obteve-se valores para o ERM de 0,18% e EQM de $3x10^{-4}$.

Relacionando as saídas da RNA com estimação de idade óssea, o método proposto apresentou resultados expressivos, sem diferenças estatisticamente significativas pelo *T-Student* com nível de significância de 5%.

Analisando a concordância com tolerância de erro de 0,5 anos foi obtido uma taxa de acerto de 88%, e para a tolerância de 1 ano foi obtido 98%. Portanto, respeitando as tolerâncias de acordo com os métodos clássicos, que permitem desvios de até no máximo 1 ano para as aplicações clínicas, a metodologia proposta mostrou-se eficiente e aplicável clinicamente.

O EMA médio obtido para ambos os sexos está em torno de 0,4 anos. Isto significa que considerando todas as amostras do conjunto de teste, o erro médio de estimação foi de 0,4 anos, novamente respeitando a tolerância dos métodos clássicos e de aplicações clínicas.

Portanto, os resultados comprovam que as informações do polinômio extraídas da concavidade da C3 tem alta correlação com a idade óssea do indivíduo, permitindo serem utilizadas em novas metodologias ou no melhoramento das atuais.

5.3. Contribuições

A principal contribuição deste trabalho é a proposta do uso de uma característica ainda não explorada em métodos de estimação de idade óssea cervical. Trata-se do polinômio que representa a concavidade inferior da C3. Essa nova abordagem e este trabalho contribuíram para:

- A proposta de uma metodologia para a segmentação dos ossos das vértebras cervicais;

- A proposta de um procedimento para a extração do polinômio da concavidade da C3, permitindo ser utilizado de forma direta ou indireta em métodos de estimação de idade óssea.

- A extração do polinômio que, apesar de um dos seus procedimentos ocorrer de forma dirigida (demarcação da concavidade), foi capaz de proporcionar outros dois novos parâmetros, a área e máxima altura da concavidade, ambos de forma automática e precisa, isenta de subjetividade;

- A proposta de uma nova metodologia para a estimação de idade óssea por meio de apenas uma característica (polinômio) de uma única vértebra (C3);

- A proposta de um novo método para estimar com confiança a idade óssea, por meio da combinação de características já conhecidas (AH3 e AP3) juntamente com a nova característica (CP);

- A validação e a superioridade no uso de RNA frente a RLM como procedimento para identificar e correlacionar o comportamento de características das vértebras com a idade óssea. Isto permite que metodologias já desenvolvidas possam ser analisadas por RNA aumentando a correlação e precisão nas estimativas;

5.4. Trabalhos futuros

Para pesquisas futuras pode-se investigar:

- Aperfeiçoar a metodologia referente a segmentação de imagens visando a remoção das estruturas indesejadas, o que permitirá o uso de rotinas para a extração automática de características dos corpos vertebrais;

- Testar o polinômio em conjunto com outras características da literatura, para verificar se também haverá melhorias;

- Analisar a hipótese do comportamento da área e da máxima altura da concavidade estarem correlacionadas, ou seja, se existe uma normalidade na proporção do crescimento da área e da altura da concavidade. Isto pode ser realizado testando essas características em duas bases diferentes, o primeiro composto por indivíduos com crescimento normal e outro com algum distúrbio. Assim, pode-se verificar se a hipótese proposta é verdadeira para qualquer ser humano ou para apenas um desses cenários;

- Aplicar a análise estatística proposta, entretanto em uma base de dados maior e diferida por faixa etária, para verificar melhorias na precisão desta metodologia ou uma divergência para alguma faixa etária e/ou gênero.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS[7]

[7] Esta dissertação foi elaborada de acordo com as seguintes normas em vigor: Universidade de São Paulo. **Sistema Integrado de Bibliotecas da USP. Diretrizes para apresentação de dissertações e teses da USP : documento eletrônico e impresso Parte I (ABNT)** / Sistema Integrado de Bibliotecas da USP ; Vânia Martins Bueno de Oliveira Funaro, coordenadora ... [et al.] . - - 2. ed. rev. ampl. - - São Paulo : Sistema Integrado de Bibliotecas da USP, 2009. 102 p. - - (Cadernos de Estudos ; 9)

BACCETTI, T.; FRANCHI, L.; MCNAMARA JR., J. A. An improved version of the cervical vertebral maturation (CVM) method for the assessment of mandibular growth. **Angle Orthodontist**, v. 72, n. 4, p. 316-323, 2002.

_____. The cervical vertebral maturation (CVM) method for the assessment of optimal treatment timing in dentofacial orthopedics. **Seminars in Orthodontics**, v.11, p. 119-129, 2005.

BAPTISTA, et al. Desenvolvimento e avaliação de um classificador de padrões para análise do crescimento facial pelo método de maturação vertebral cervical. **Journal of Health Informatics**, v. 3, n. 2, p. 64-68, abr./jun. 2011.

BEHIELS, G. et al. Retrospective correction of the heel effect in hand radiographs. **Medical Image Analysis**, v. 6, p. 183-190, 2002.

BENCH, R. W. Growth of the cervical vertebrae as related to tongue, face and denture behavior. **American Journal of Orthodontics**, v. 49, n. 3, p.183-214, mar. 1963.

BROADBENT, B. H. A new X-ray technique and its application to orthodontia: The introduction of Cephalometric Radiography. **The Angle Orthodontist**, v. 2, p. 45-66, abr. 1931.

CALDAS, M. P. **Avaliação da maturação esquelética na população brasileira por meio da análise das vértebras cervicais**. 2007. 59 f. Dissertação (Mestrado em Radiologia Odontológica) – Faculdade de Odontologia de Piracicaba, Universidade Estadual de Campinas, Piracicaba. 2007.

_____. **Análise computadorizada da idade óssea vertebral em radiografias cefalométricas laterais na população brasileira**. 2009. 77 f. Tese (Doutorado em Radiologia Odontológica) – Faculdade de Odontologia de Piracicaba, Universidade Estadual de Campinas, Piracicaba. 2009.

CALDAS, M. P.; AMBROSANO, G. M. B.; HAITER NETO, F. Computer-assisted analysis of cervical vertebral bone age using cephalometric radiographs in Brazilian subjects. **Brazilian Oral Research**, v. 24, n. 1, p. 120-126, jan./mar. 2010.

DELORME, A. L. **Metodologia automática de estimação de idade óssea utilizando análise de forma em radiografias carpais**. 2010. 77 f. Dissertação (Mestrado em Ciências, Programa de Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2010.

EKLOF, O.; RINGERTZ, H. A method for assessment of skeletal maturity. **Annals Radiology**, v. 10, n. 3, p. 330-336, 1967.

FISHMAN, L. S. Chronological versus skeletal age, an evaluation of craniofacial growth. **The Angle Orthodontist**, v. 49, n. 3, p. 181-189, jul. 1979.

FISHMAN, L. S. Radiographic evaluation of skeletal maturation. A clinically oriented method based on hand-wrist films. **The Angle Orthodontist**, v. 52, n. 2, p. 88-112, abr. 1982.

FOLEY, J. D. et al. **Computer Graphics: Principles and Practice**. 2nd. ed. Addison-Wesley, 1990.

GONZALEZ, R.; WOODS, R. E. **Digital image processing**. 3nd. ed. Pearson/Prentice Hall, 2008.

GREULICH, W. W.; PYLE, S. I. **Radiographic atlas of skeletal development of the hand and wrist**. Stanford: Stanford University Press, 1959.

HAGAN, M.; MENHAJ, M. Training feedforward networks with the marquardt algorithm. **Neural Networks, IEEE Transactions on**, v. 5, n. 6, p. 989–993, nov. 1994.

HAITER NETO, F. et al. Skeletal age assessment: A comparison of 3 methods. **American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics,** v. 130, n. 4, p. 435.e15-435.e20, oct. 2006.

HASSEL, B.; FARMAN, A. G. Skeletal maturation evaluation using cervical vertebrae. **American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics**, v. 107, n. 1, p. 58-66, jan. 1995.

JAQUEIRA, L. F. **Estudo radiográfico comparativo da maturação óssea das vértebras cervicais utilizando três métodos inspecionais**. 2008. 78 f. Dissertação (Mestrado em Clínica Odontológica) – Fundação Comunitária Tricordiana de Educação, Universidade Vale do Rio Verde de Três Corações, Três Corações. 2008.

LAMPARSKI, D. G. **Skeletal age assessment utilizing cervical vertebrae**. Dissertation (Master of Dental Science) – Faculty of the School of Dental Medicine, University of Pittsburgh, Pittsburgh. 1972.

LOULY, F. et al. Estimativa da idade esquelética através do estudo radiográfico da anatomia das vértebras cervicais. **Revista UNINGÁ**, n. 24, p. 239-251, abr./jun., 2010.

MITO, T.; SATO, K.; MITANI, H. Cervical vertebral bone age in girls. **American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics**, v. 122, n. 4, p. 380-385, oct. 2002.

MORAES, D.R. et al. Metodologia para segmentação de região de interesse visando a extração automática de características das vértebras cervicais para estimação de idade óssea. In: VIII WVC (WORKSHOP DE VISÃO COMPUTACIONAL), 2012, Goiânia. **Anais**... Goiânia: INF/UFG, 2012a.

_____. Estimação de idade óssea cervical: uso de polinômio para identificar o comportamento da concavidade da C3. In: XXIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA BIOMÉDICA, 2012, Porto de Galinhas. **Anais**... Porto de Galinhas: SBEB, 2012b.

MORAES, D. R.; CASATI, J. P. B.; RODRIGUES, E. L. L. Analysis of polynomial behavior of the C3 cervical concavity to bone age estimation using artificial neural networks. In: 4th IEEE BIOSIGNALS AND BIOROBOTICS CONFERENCE, 2013, Rio de Janeiro. **Anais**... Rio de Janeiro: BRC/ISSNIP, 2013.

NIEMEIJER, M. **Automating skeletal age assessment**. 2002. 75 f. Master's Thesis – Institute of Information and Computing Sciences, Universiteit Utrecht, Utrecht. 2002.

OLIVETE, C. J. **Estimativa da idade óssea através da análise carpal baseada na simplificação do método de Eklof e Ringertz**. 2005. 112 f. Dissertação (Mestrado em Ciências, Programa de Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2005.

_____. **Novos métodos para estimativa da idade óssea baseados no processamento de imagens radiográficas da mão**. 2009. 164 f. Tese (Doutorado em Ciências, Programa de Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2009.

OLIVETE, C. J.; RODRIGUES, E. L. L. Estimador da idade óssea via análise carpal / Anacarp - Software para estimação da idade óssea baseado no método de Eklof & Ringertz. In: VI WORKSHOP DE INFORMÁTICA MÉDICA, 2006, Vila Velha. **Anais...** Sociedade Brasileira de Computação, 2006. p. 123-131.

O'REILLY, M. T.; YANNIELLO, G J. Mandibular growth changes and maturation of cervical vertebrae - a longitudinal cephalometric study. **The Angle Orthodontist**, v. 58, p. 179-184, abr. 1988.

OTSU, N.. A threshold selection method from gray-level histograms. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, v. 9, n. 1, p. 62-66, 1979.

PLASSCHAERT, A. S. **Estudo comparativo da aplicabilidade do software CEF-X com o método inspecional da maturação óssea das vértebras cervicais**. 2005. 64 f. Dissertação (Mestrado em Clínica Odontológica) – Fundação Comunitária Tricordiana de Educação, Universidade Vale do Rio Verde de Três Corações, Três Corações. 2005.

QUEIROZ, A. C. **Metodologia de extração automática de caraterísticas da mão para a estimação da idade óssea utilizando redes neurais artificiais no processo de decisão**. 2006. 89 f. Dissertação (Mestrado em Ciências, Programa de Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2006.

RAYMUNDO, E. M. **Metodologia de estimação de idade óssea baseada em características métricas utilizando mineradores de dados e classificador neural**. 2009. 129 f. Dissertação (Mestrado em Ciências, Programa de Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2009.

SAN ROMÁN, P. et al. Skeletal maturation determined by cervical vertebrae development. **European Journal of Orthodontics**, v. 24, p. 303-311, 2002.

SEEDAT, A.K; FORSBERG, C.D. An evaluation of the third cervical vertebra (C3) as a growth indicator in Black subjects. **Journal of the South African Dental Association**, v. 60, n.4, p. 156-160, 2005.

SILVA, I.; SPATTI, D.; FLAUZINO, R. Redes neurais artificiais para engenharia e ciências aplicadas: curso prático. 1st ed. Artliber, 2010.

TANAKA, J. L. O. **Estudo da relação entre a análise de maturação das vértebras cervicais por meio de medidas em radiografias cefalométricas laterais e a curva de crescimento ósseo**. 2006. 109 f. Dissertação (Mestrado em Biopatologia Bucal, Área Radiologia Odontológica) – Faculdade de Odontologia de São José dos Campos, Universidade Estadual Paulista, São José dos Campos, 2006.

_____. **Desenvolvimento e análise de um método de avaliação de maturação óssea por meio de medidas das vértebras cervicais em radiografias cefalométricas laterais**. 2008. 105. Tese (Doutorado em Biopatologia Bucal, Área Radiologia Odontológica) – Faculdade de Odontologia de São José dos Campos, Universidade Estadual Paulista, São José dos Campos, 2008.

TANNER, J. M.; WHITEHOUSE, R. H. **Standards for skeletal maturity**. Paris: International Childrens Centre, 1959.

TANNER, J. M.; WHITEHOUSE, R. H.; HEALY, M. J. R. A new system for estimating skeletal maturity from the hand and wrist, with standards derived from a study of 2600 healthy British children. Part II: the scoring system. Paris: International Childrens Centre, 1962.

TANNER, J. M. et al. **Assessment of skeletal maturity and prediction of adult height (TW2 Method)**. New York: Academic Press, 1975.

TANNER, J. M. et al. **Assessment of skeletal maturity and prediction of adult height (TW2 Method)**. New York: Academic Press, 1983.

TANNER, J.M. et al. **Assessment of skeletal maturity and prediction of adult height (TW3 Method)**. 3th ed: W.B. Saunders, 2001.

TODD, T.W. **Atlas of skeletal maturation.** St. Louis, Mosby, 1937.

ZUIDERVELD, K. Contrast limited adaptive histograph equalization. **Graphic Gems IV**. San Diego: Academic Press Professional, p. 474–485, 1994.

APÊNDICE A – ANÁLISE DE DADOS PARA O COEFICIENTE DO POLINÔMIO

Valor de r_{max} do melhor treinamento de cada topologia para cada gênero.

Topologia*	r_{max} Masculino	r_{max} Feminino
1	0,8531	0,8045
2	0,8062	0,8605
3	0,8467	0,8526
4	0,8186	0,8604
5	0,8219	0,8577
6	0,8498	0,8675
7	0,8500	0,8588
8	0,8914	0,8817
9	0,8694	0,8678
10	0,8137	0,8006
11	0,8875	0,8458
12	0,8312	0,8921
13	0,7935	0,8843
14	0,8255	0,8094
15	0,7772	0,8156
16	0,8392	0,8577
17	0,8192	0,8479
18	0,8038	0,8656
19	0,8190	0,8627
20	0,8118	0,8151

** Refere-se ao número de neurônios na camada escondida*

Informações de treinamento referentes a melhor topologia para cada gênero.

Dados de Treinamento	Masculino	Feminino
Nº do melhor treinamento	1	7
Nº de neurônios	8	12
Nº de épocas	9	10
Nº de amostras	41	48
r	0,8914	0,8921
ERM	6,64%	6,45%
EQM	$2,1 \times 10^{-3}$	2×10^{-3}
Gradiente	$7,13 \times 10^{-4}$	$1,96 \times 10^{-4}$

Parâmetros para a média dos laudos versus a metodologia proposta para cada gênero.

Parâmetros	Masculino		Feminino	
	Laudos	Proposto	Laudos	Proposto
Média	12,79	12,77	12,38	12,41
Desvio Padrão	2,09	1,71	1,97	1,24
Variância	4,38	2,94	3,87	1,54
T-Student	p = 0,8808		p = 0,8346	

Resultados de concordância do método proposto para cada gênero.

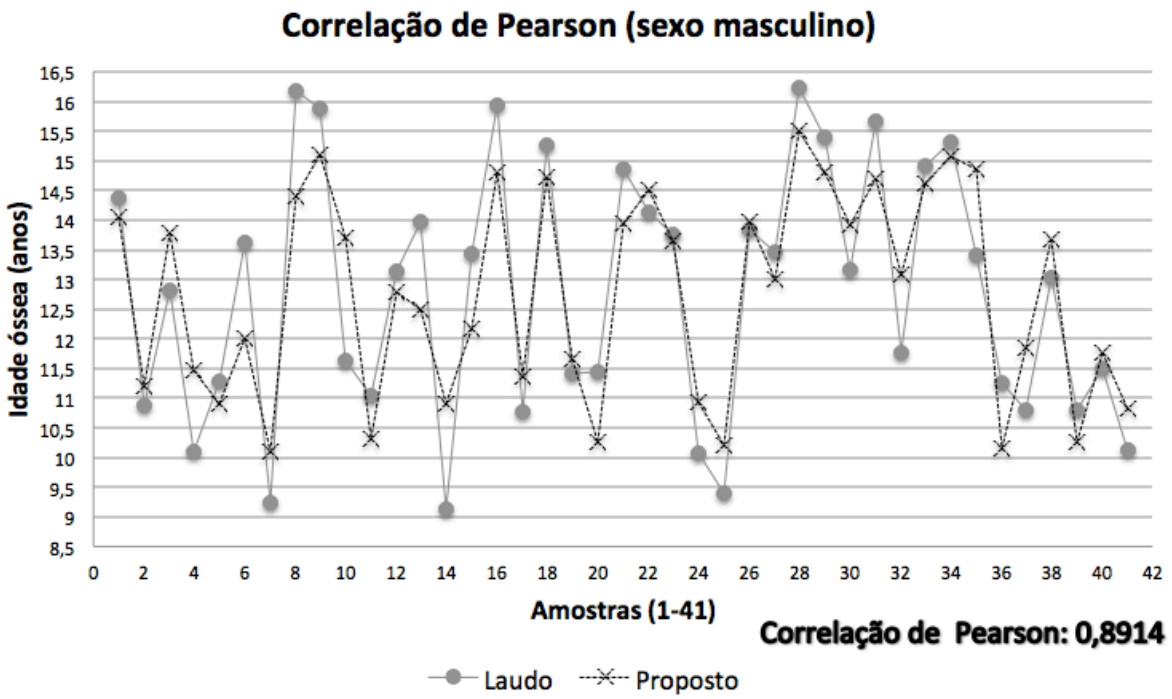
Desvio padrão*	Masculino	Feminino
0	9,76%	27,08%
0,5	48,78%	54,17%
1	78,05%	72,92%
1,5	92,68%	91,67%
2	100%	95,83%
2,5	100%	100%

** Valores expressos em anos*

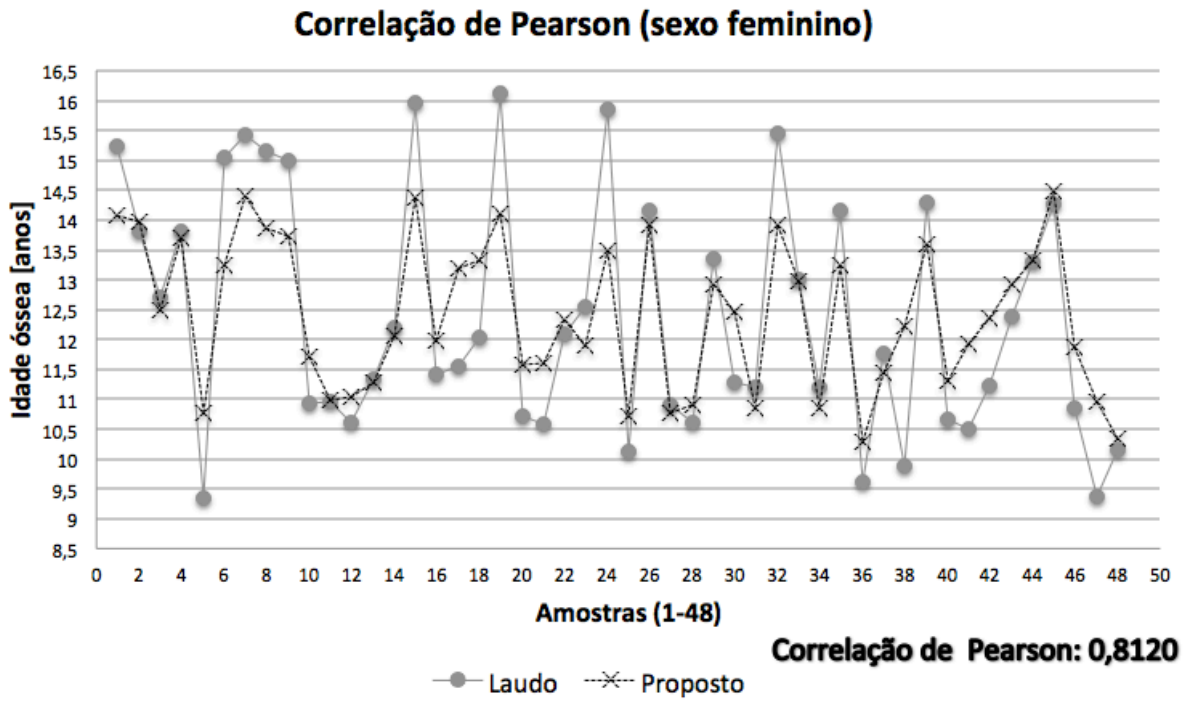
Resultados do EMA para o método proposto para cada gênero.

Erro	Masculino	Feminino
EMA*	0,81	0,83

** Valores expressos em anos*



Correlação de Pearson das idades ósseas entre as médias dos laudos e o método proposto para o sexo masculino.



Correlação de Pearson das idades ósseas entre as médias dos laudos e o método proposto para o sexo feminino.

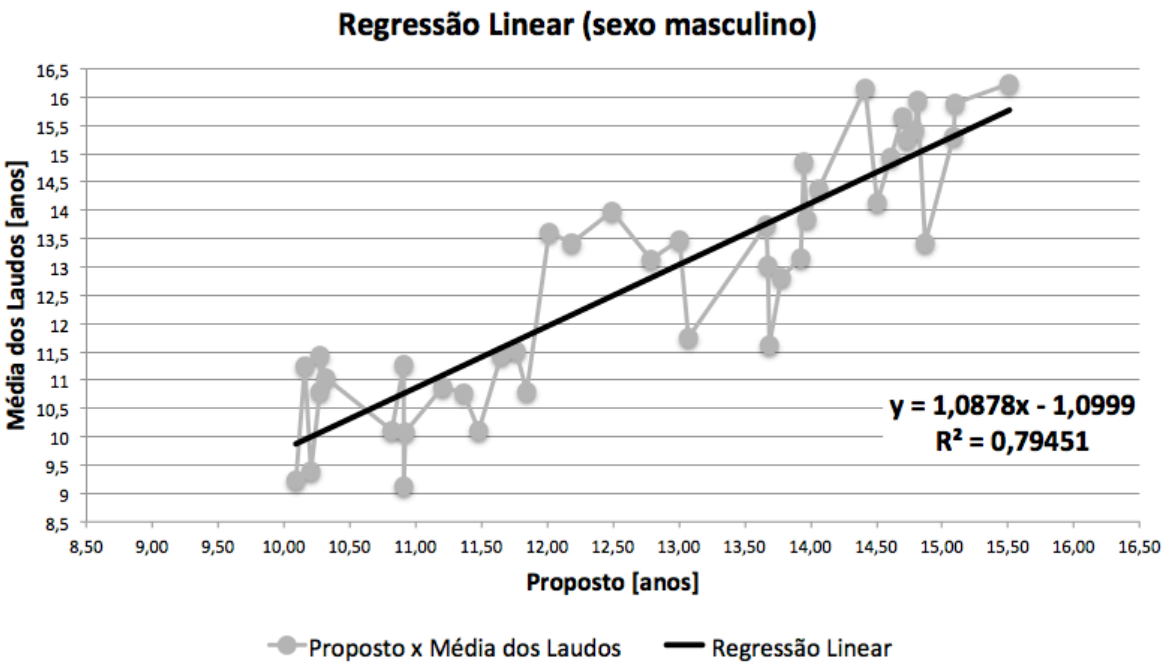


Diagrama de dispersão, regressão linear (reta e equação) e coeficiente de determinação R^2 para o sexo masculino.

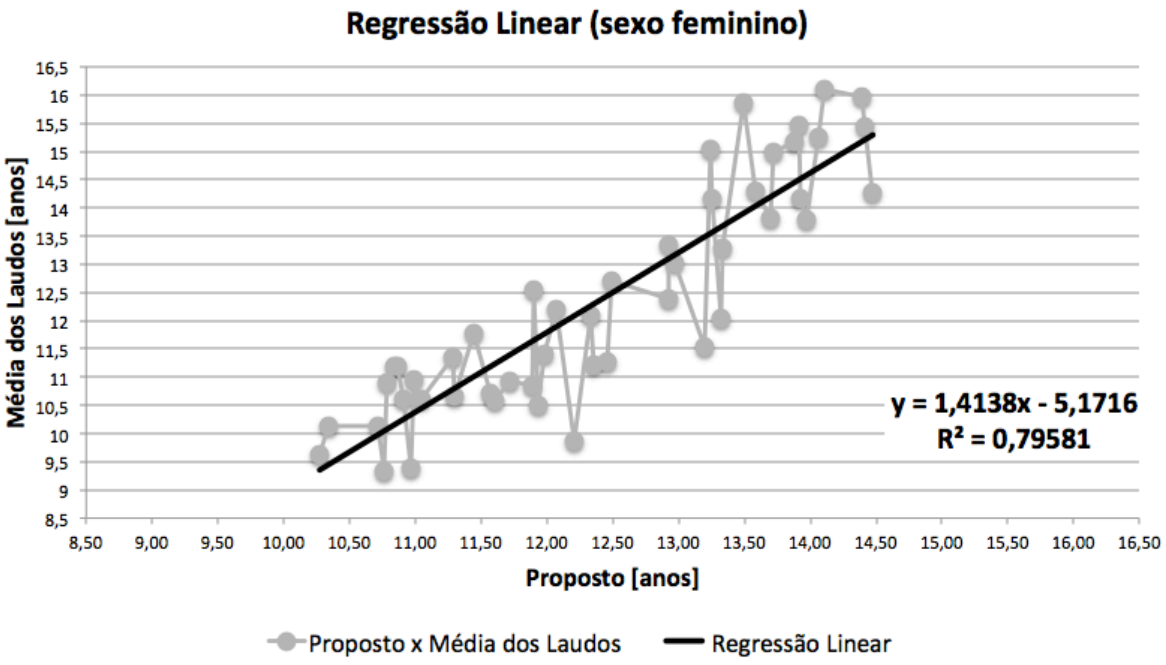
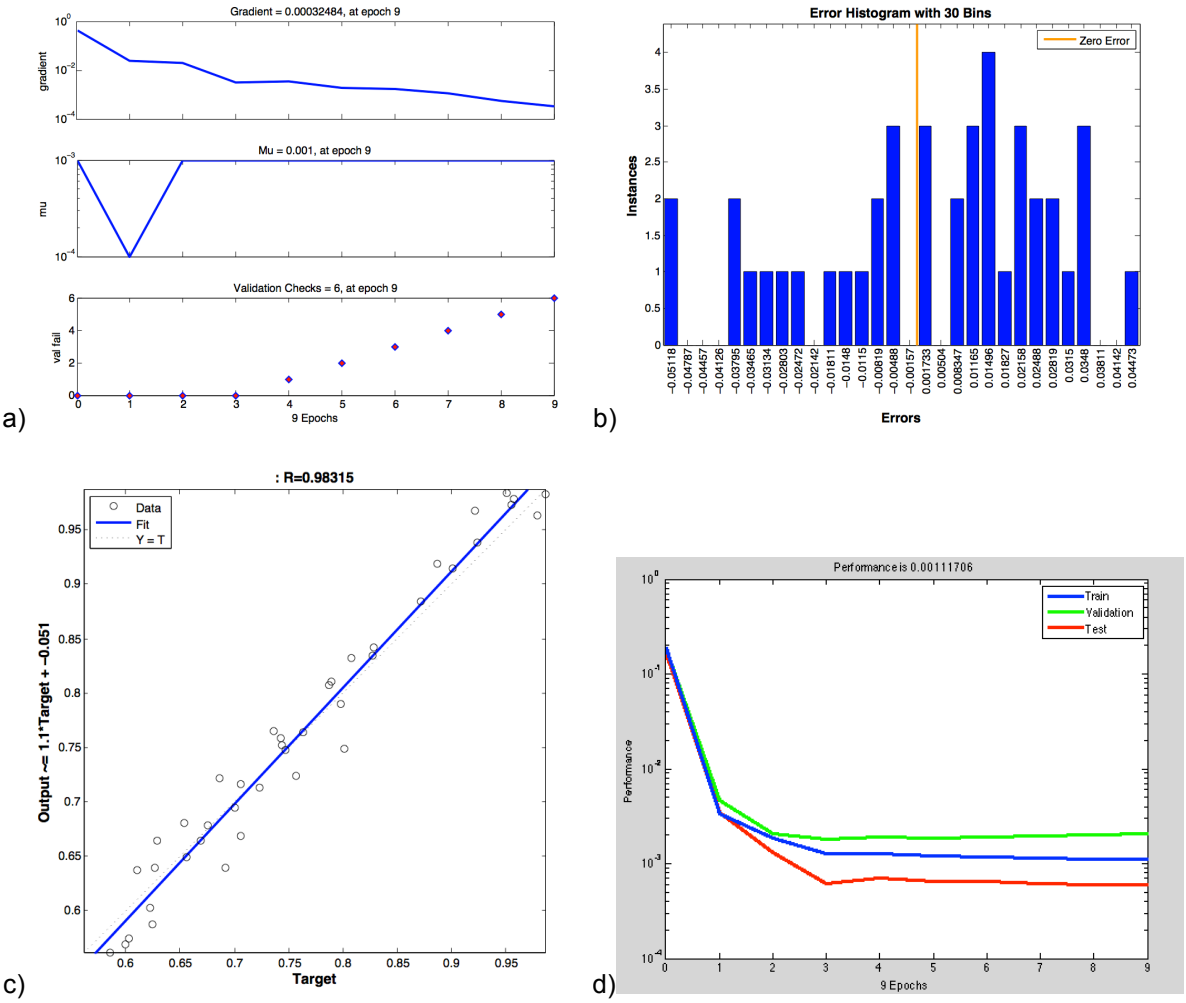
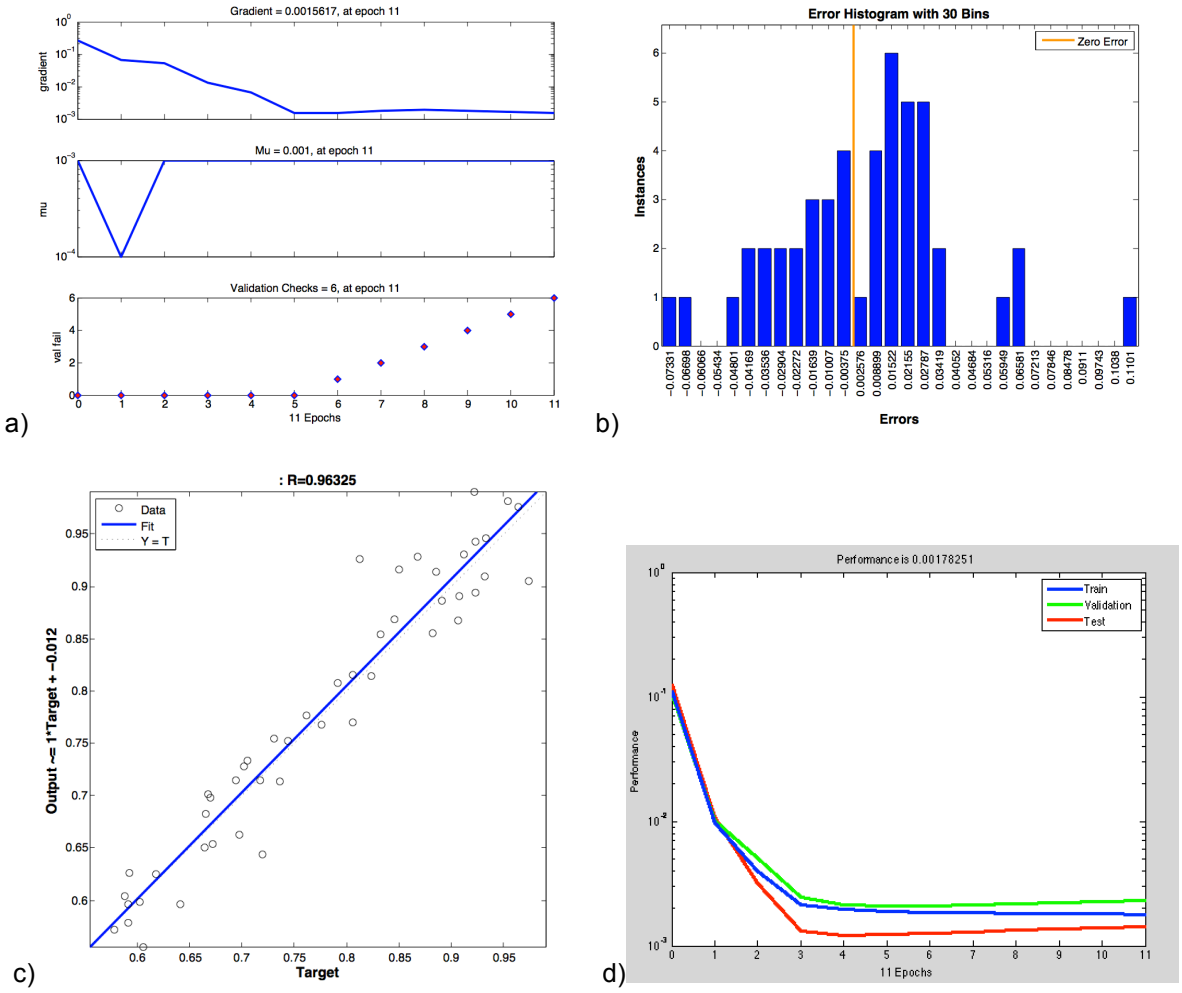


Diagrama de dispersão, regressão linear (reta e equação) e coeficiente de determinação R^2 para o sexo feminino.

APÊNDICE B – RESULTADOS DO TREINAMENTO DA RNA COM O CP



Parâmetros referente ao estágio de treinamento (a), histograma de erro (b), regressão (c) e performance (d) para o sexo masculino.



Parâmetros referente ao estágio de treinamento (a), histograma de erro (b), regressão (c) e performance (d) para o sexo feminino.