[MAC0426] Sistemas de Bancos de Dados
[IBI5013] Bancos de Dados para Bioinformática

Aula 20
Índices

Acelerando o acesso aos dados

Profa. Kelly Rosa Braghetto

08/06/2017

Representando Relações em Armazenamento Secundário

- Atributos são representados por **campos** → sequências de bytes (de tamanho fixo ou variável).
- Campos são agrupados em coleções (de tamanho fixo ou variável) chamadas de **registros**.
- Registros são armazenados em **blocos** físicos
  - Diferentes tipos de estruturas de dados podem ser usadas para os blocos → às vezes, os blocos precisam ser reorganizados quando o banco de dados é modificado.

O que são índices?

- Uma coleção de registros que forma uma relação é armazenada em disco como uma coleção de blocos chamada de **arquivo de dados.**
- Um arquivo de dados pode ter um ou mais **arquivos de índice** associados a ele.
- Cada arquivo de índice associa valores da chave de busca a ponteiros para registros nos arquivos de dados que contêm esses valores para o(s) atributo(s) da chave de busca.

Um Parênteses sobre Tipos de Chaves...

- **Chave primária** – atributo(s) que identifica(m) de forma unívoca as tuplas de uma relação
- **Chave de ordenação** – atributo(s) usado(s) para ordenar os registros no arquivo de dados
- **Chave de busca** – atributo(s) usados para a busca de tuplas por meio de um índice

Às vezes, uma só chave faz o papel das três.

Índices

- ***Índice*** → estrutura de dados usada para acelerar o acesso às tuplas de uma relação dados valores para um ou mais atributos (= chave de busca)
- Índices evitam varreduras nas relações (“table scans”)
  - Tuplas são localizadas imediatamente
- Índices são mantidos pelos SGBDs e ficam armazenados nos seus respectivos bancos de dados

Tipos de Índices

- **Densos X Esparsos**
  - Índice denso: possui uma entrada no arquivo para cada registro no arquivo de dados
  - Índice esparso: possui entradas somente para alguns dos registros no arquivo de dados (geralmente, uma entrada no índice para cada bloco do arquivo de dados)
    - Só pode ser usado se o arquivo de dados estiver ordenado pela chave de busca

Tipos de Índices

- **Primários X Secundários**
  - **Índice primário:** é especificado sobre o(s) atributo(s) da chave de ordenação do arquivo de dados
  - **Índice secundário:** não determina a localização dos registros.
- Uma relação pode ter no máximo um índice primário (geralmente criado sobre a chave primária), mas pode ter vários índices secundários sobre outros atributos.

Estruturas de Dados Usadas como Índices

- Vários tipos de estruturas de dados podem ser usadas como índices
- Veremos neste curso:
  - Índices simples, sobre arquivos de dados ordenados (índices primários)
  - Índices secundários, sobre arquivos de dados não ordenados
  - Árvores B+
  - Tabelas *Hash*

Arquivo Sequencial

- É um arquivo de dados com registros ordenados segundo uma chave de ordenação
- Geralmente, usa-se a chave primária da relação como chave de ordenação
  - Mas pode ser usado com outros atributos também

Arquivo Sequencial

- Vantagens:
  - Leitura dos registros pela ordem da chave de ordenação é feita de forma eficiente
  - Encontrar o próximo registro a partir do registro atual (quase sempre) não requer a leitura de um novo bloco do disco
  - Buscar um registro pelo valor da chave de ordenação pode ser feito de forma eficiente (com busca binária, por exemplo)

Arquivo Sequencial

- Desvantagens:
  - A ordenação não facilita a busca de registros por outros atributos diferentes da chave de ordenação
  - Inserção e exclusão de registros são operações dispendiosas → registros devem permanecer fisicamente ordenados
    - Para diminuir o impacto desse problema, costuma-se manter algum espaço livre em cada bloco ou um bloco especial (de *overflow*) para acomodar a inserção de novos registros

Índice Primário Denso

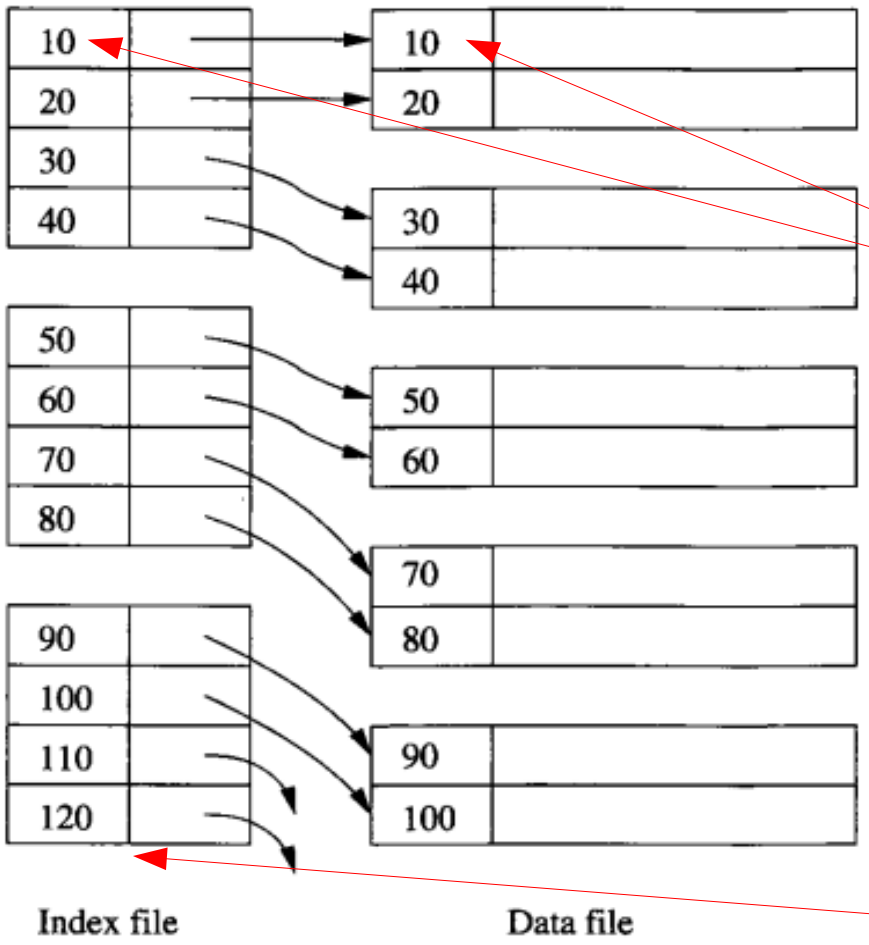


Figure 14.2: A dense index (left) on a sequential data file (right)

Cada bloco do arquivo de dados acomoda só 2 registros

Valor da chave de ordenação do registro

Cada bloco do arquivo de índice acomoda 4 pares chave-ponteiro

Neste exemplo, chave de ordenação = chave primária da relação

Índice Primário Denso

- **Índice denso** é uma sequência de blocos que armazenam apenas as chaves dos registros e ponteiros (endereços) para eles
- É denso porque toda chave no arquivo sequencial é representada no índice
- Se o par (chave,ponteiro) ocupa menos espaço que o registro inteiro, o índice ocupa menos blocos do que o arquivo de dados em si
  - Particularmente vantajoso quando o índice cabe na memória principal (e o arquivo de dados não!) → pelo índice, podemos encontrar qualquer registro dado sua chave de busca com apenas um acesso ao disco.

Índice Primário Esparso

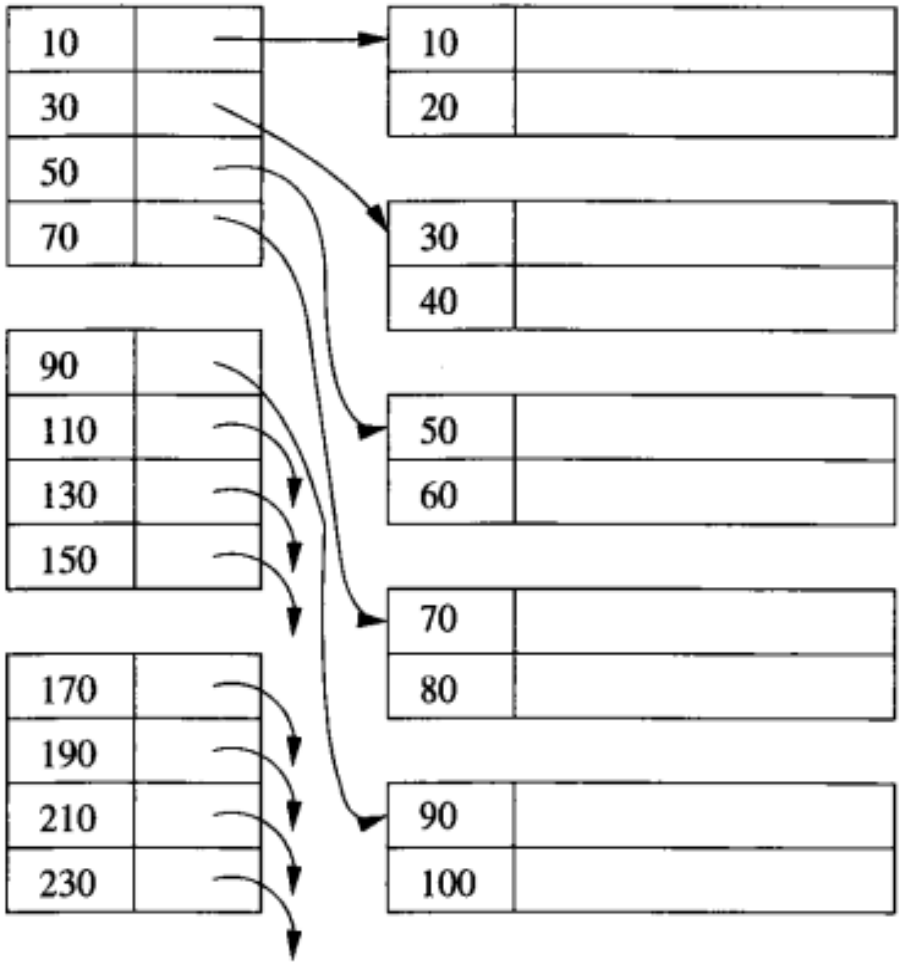


Figure 14.3: A sparse index on a sequential file

Índice Primário Esparso

- Geralmente mantém apenas uma chave para cada bloco do arquivo de dados
  - A chave mantida é a do primeiro registro do bloco
- Ocupa menos espaço que um índice denso, ao custo de se demorar um pouco mais para encontrar um registro dada a sua chave
- Mais fácil “de caber” na memória principal
- Assim como um índice denso, possibilita o uso de busca binária para localizar uma chave
- Diferentemente de um índice denso, não nos permite responder a consultas do tipo “existe algum registro com o valor *k* para a chave?” olhando apenas para as entradas no índice (ou seja, sem envolver o acesso aos blocos do arquivo de dados)

Índice Primário Esparso Multinível

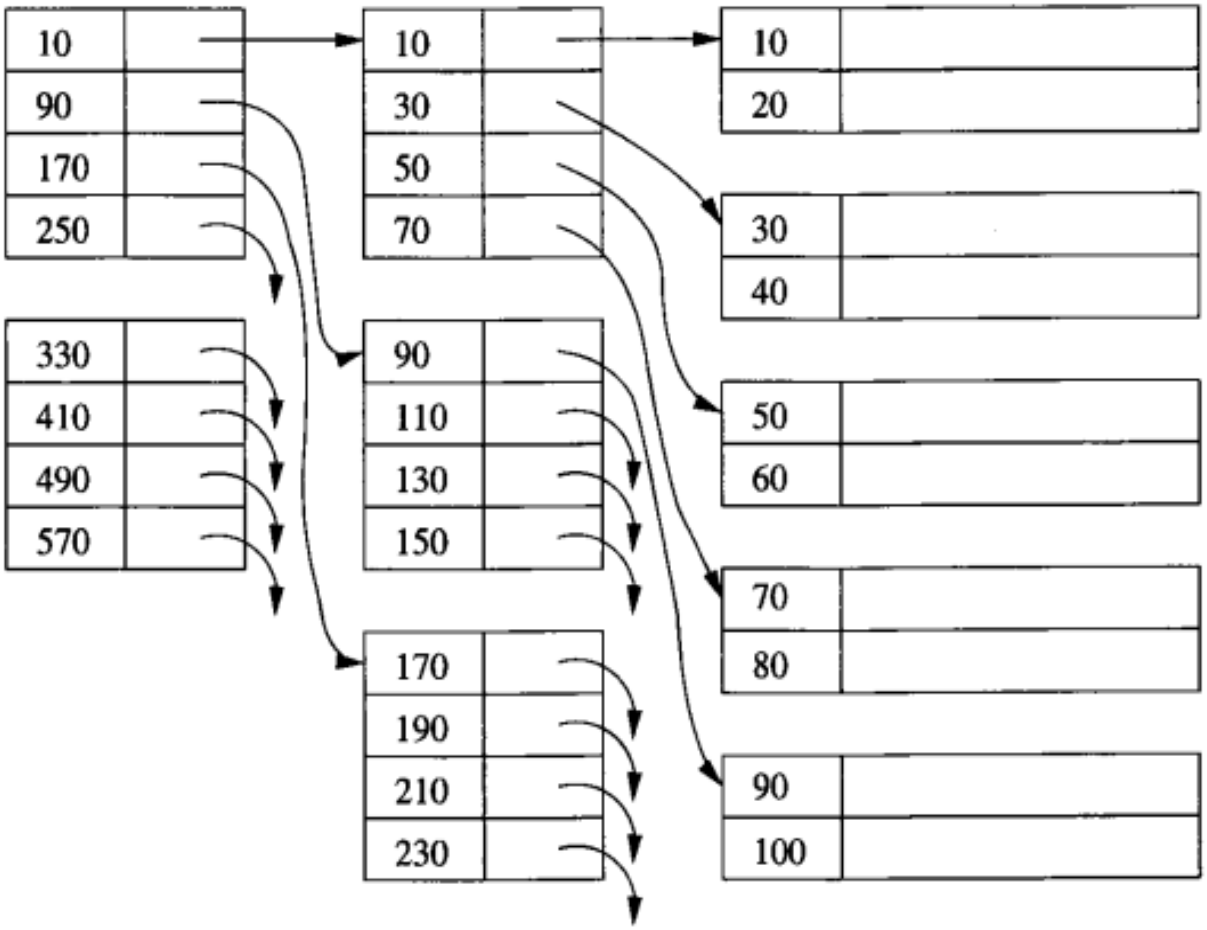


Figure 14.4: Adding a second level of sparse index

Índice Primário Esparso Multinível

- Um índice pode cobrir muitos blocos
- A busca binária por uma chave no índice pode demandar a leitura (do disco) de vários blocos do índice
- Colocando um índice sobre o índice, reduzimos o número de blocos de índice que precisam ser lidos do disco para se encontrar um dado registro por meio de sua chave

Índice Secundário

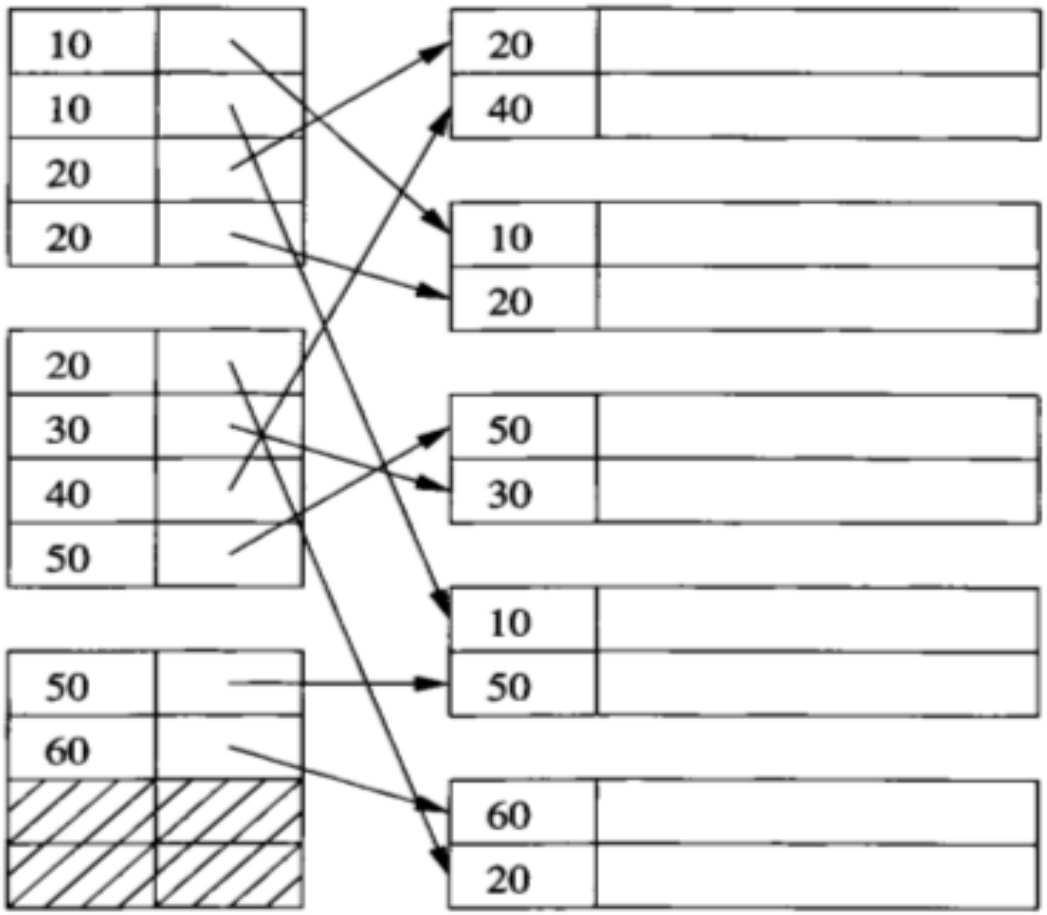


Figure 14.5: A secondary index

Índices secundários são sempre densos! Por quê?

Índice Secundário

- Com frequência, precisamos realizar buscas sobre atributos que não são a chave primária (ou a chave de ordenação) da relação
  - Índices secundários facilitam esse tipo de buscas
- Um índice secundário não “decide” qual deve ser a localização dos registros no arquivo de dados
  - Essa localização é definida pelo índice primário
  - Um índice secundário apenas nos informa sobre essa localização

Índice Secundário

- Como um índice secundário não influencia a localização, ele não pode ser usado para predizer a localização de um registro cuja chave não aparece no arquivo do índice explicitamente
  - **Por isso, índices secundários são sempre densos**
- Para facilitar as buscas, as entradas num índice secundário aparecem ordenadas pela chave de busca
  - Mas os registros no arquivo de dados não!
- A chave de busca usada em um índice secundário não precisa ser única
  - Podem aparecer chaves repetidas no arquivo de índice

Índice Secundário Multinível

- Assim como ocorre num índice primário, é possível adicionar um segundo nível (esparso) num índice secundário
  - Esse nível pode conter pares (chave, ponteiro) correspondentes à primeira chave de cada bloco no índice denso ou à primeira ocorrência de cada chave no índice denso
  - Objetivo: reduzir o número de blocos de índice que precisam ser lidos do disco na busca por uma chave

Desperdício de Espaço em Índices Secundários

Espaço gasto com chaves repetidas

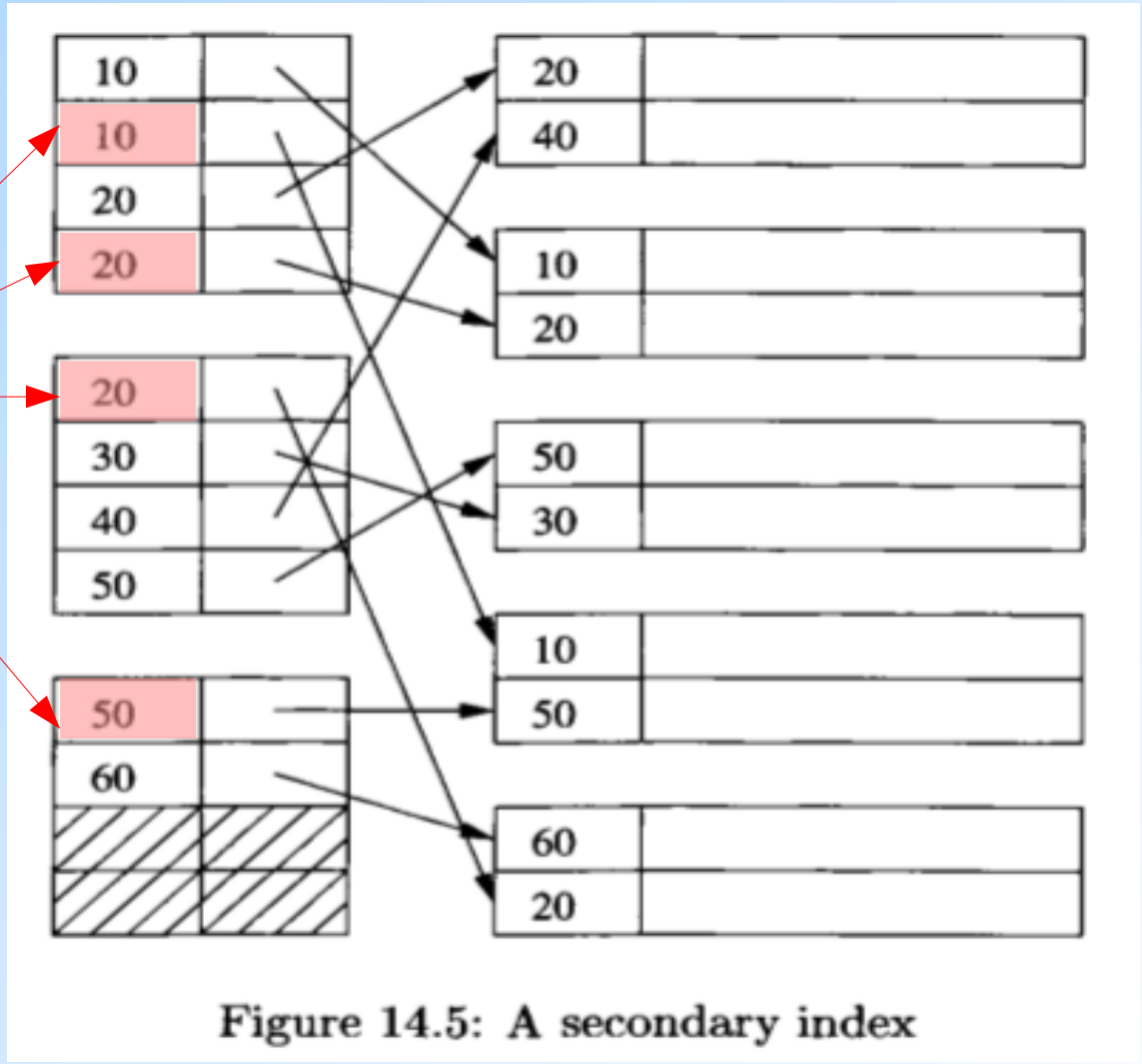


Figure 14.5: A secondary index

Índice Secundário com Indireção

- Pode haver um desperdício significativo de espaço na estrutura de índice do slide anterior
- Se uma dada chave de busca aparece *n* vezes no arquivo de dados, então ela é escrita *n* vezes no arquivo de índice
  - Seria melhor escrevê-la uma única vez no índice
- Essa repetição de valores pode ser evitada usando um nível de indireção (*buckets*) entre o arquivo de índice secundário e o arquivo de dados (ver exemplo no próximo slide)

Índice Secundário com Indireção

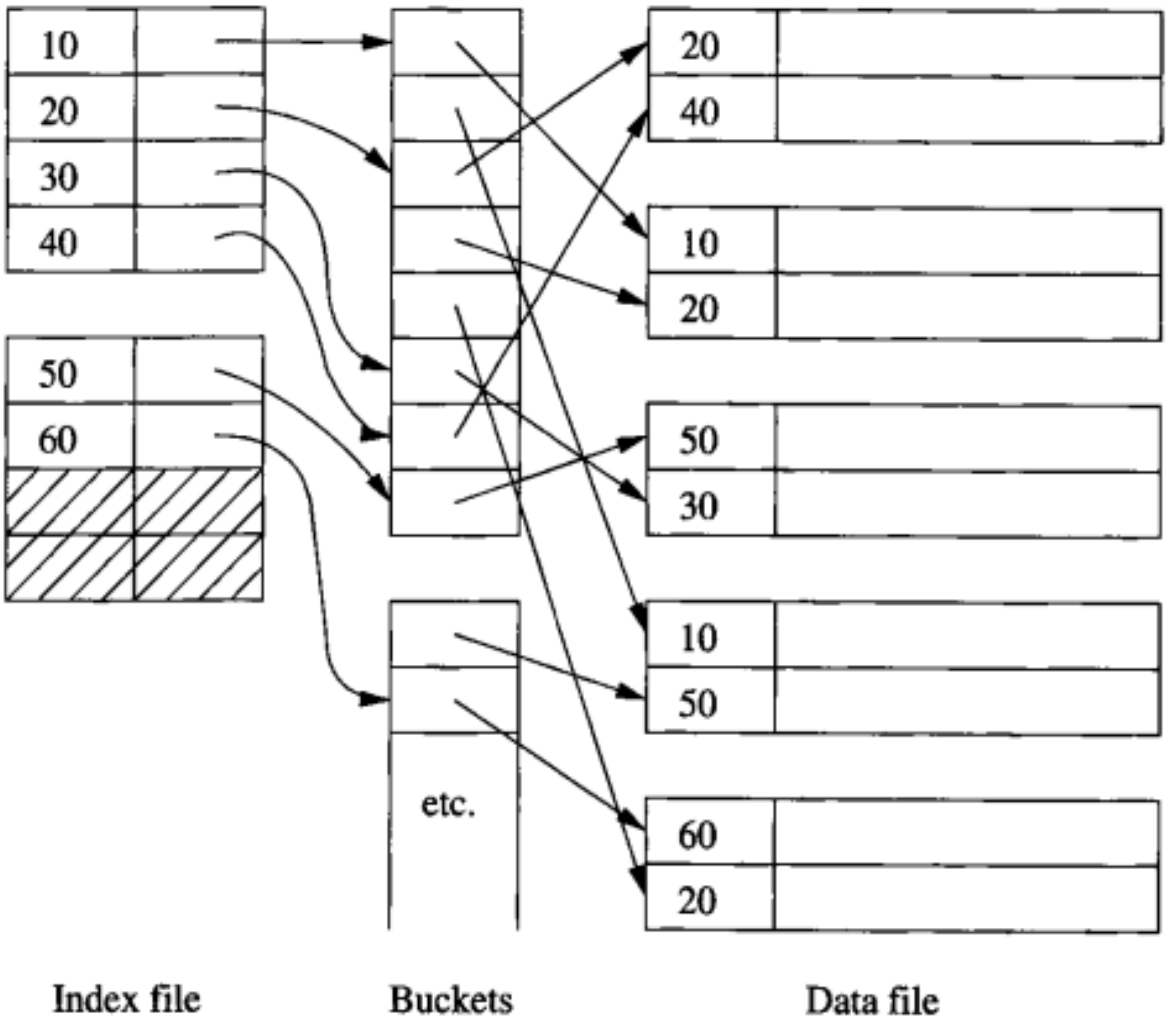


Figure 14.7: Saving space by using indirection in a secondary index

Índice Secundário com Indireção

- O uso da indireção tem duas vantagens:
  - Economia espaço se os valores das chaves de busca forem maiores que os ponteiros e se cada chave aparecer (em média) pelo menos 2x
  - Os ponteiros nos *buckets* ajudam a responder consultas sem ter que “olhar” para a maior parte dos registros no arquivo de dados (*)

(*) Quando uma consulta tem várias condições e existe um índice secundário que a ajude, pode-se encontrar os ponteiros nos *buckets* que satisfazem todas as condições calculando (em memória) a intersecção dos conjuntos de ponteiros e recuperando apenas os registros apontados pelos ponteiros na intersecção.

Isso pode ser feito mesmo em índices sem indireção; mas o uso dos *buckets* nesse caso economiza acessos ao disco, já que os ponteiros ocupam menos espaço que pares (chave, ponteiro).

Recuperação de Documentos

- A comunidade de Recuperação de Informação lida com o problema de armazenar documentos e recuperá-los de forma eficiente dado um conjunto de palavras-chaves
- Com o advento da WWW e a possibilidade de se manter todos os documentos online, a recuperação de documentos por palavras-chaves passou a ser um dos problemas mais relevantes na área de BD
- Existem diferentes tipos de consultas que podem ser usadas nesse contexto

Recuperação de Informação

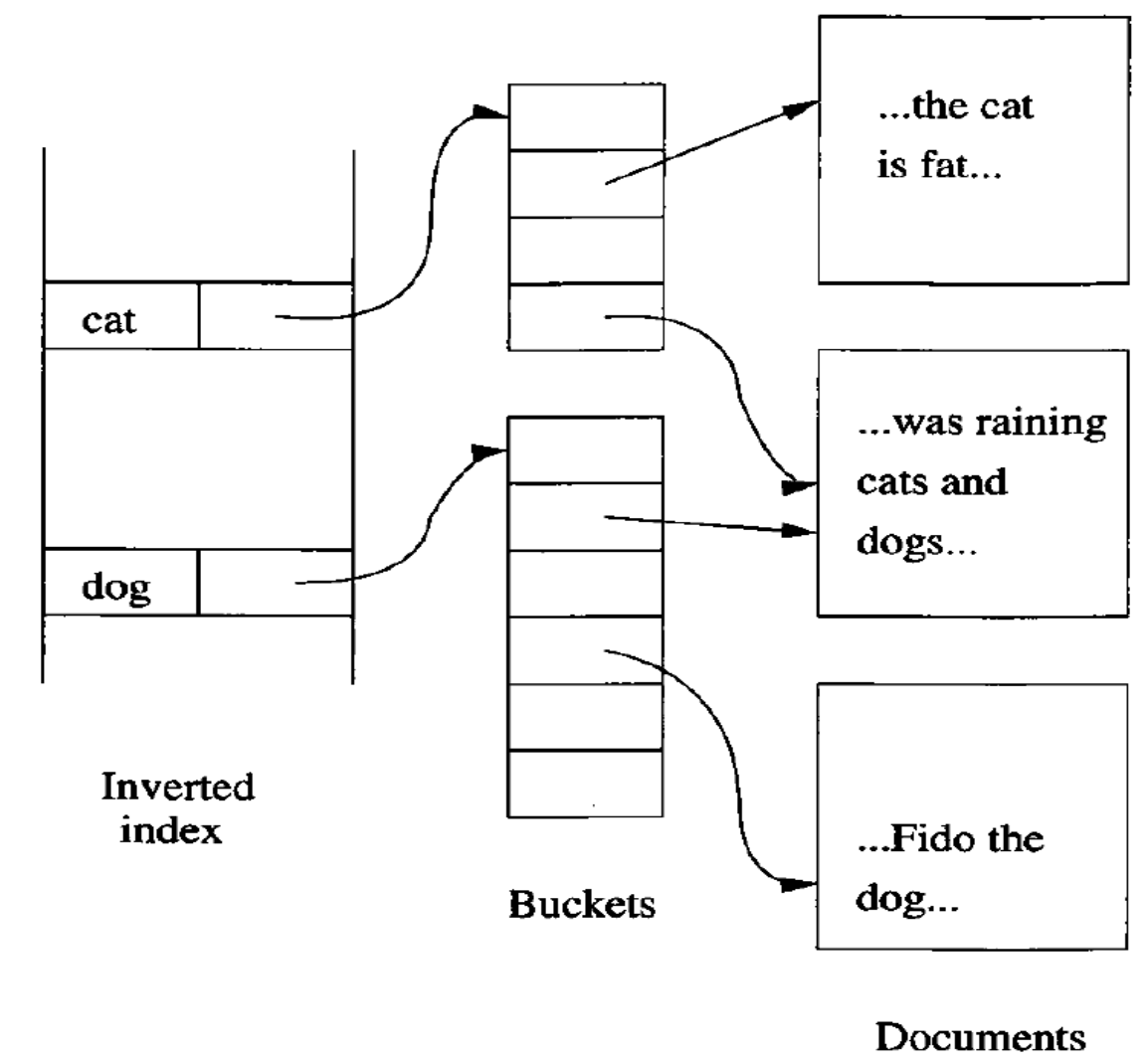
Em termos relacionais, as consultas mais simples e comuns podem ser vistas da seguinte forma:

- documento = tupla numa relação **Doc**
- **Doc** tem um atributo *booleano* para cada possível palavra que um documento nela possa conter
  - Ex: **Doc(hasCat, hasDog, …)**, onde **hasCat** é verdadeiro se e somente se o documento tem a palavra "cat" pelo menos 1 vez
- Existe um índice secundário para cada atributo de Doc
  - O índice pode manter apenas as entradas relacionadas aos documentos que contêm a palavra, ou seja, quando o valor da chave de busca é verdadeiro
- Ao invés de criar um índice separado para cada atributo (= palavra), os índices são combinados em um só – o **índice invertido**

Índices Invertidos

- Esse índice usa *buckets* para indireção, para economia de espaço

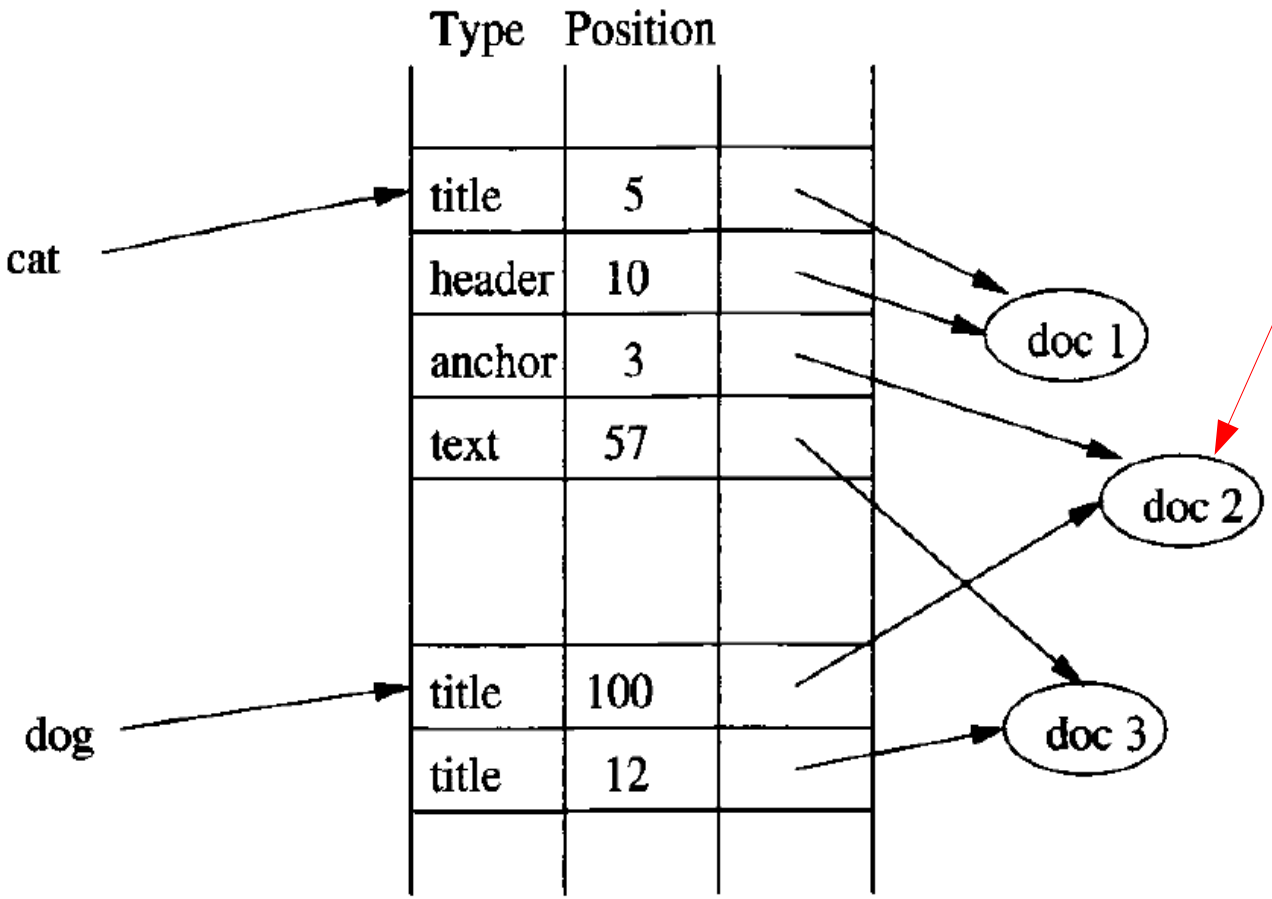
Índice Invertido



Índice Invertido

- O índice invertido é composto por um conjunto de pares (palavra, ponteiro)
  - As palavras são a chave de busca para o índice
  - Os ponteiros se referem a posições no arquivo de *buckets*.
- Ponteiros no arquivo de *buckets* podem ser:
  - Ponteiros para os documentos propriamente ditos
  - Ponteiros para uma ocorrência da palavra
    - Nesse caso, o ponteiro pode ser um par com o endereço do início do documento e um inteiro indicando o número da palavra ou a posição dela no documento.
    - Também pode-se distinguir ocorrências que aparecem no título, no resumo ou no corpo do texto. Em documentos em HTML, XML e etc., é possível associar marcações a trechos e palavras do texto.

Índice Invertido com Mais Informações Armazenadas



Possível resposta a uma busca por docs sobre cachorros e que os comparam com gatos.
(Docs que mencionam cachorro no título e mencionam gatos nas âncoras (links) são bons candidatos para a resposta.)

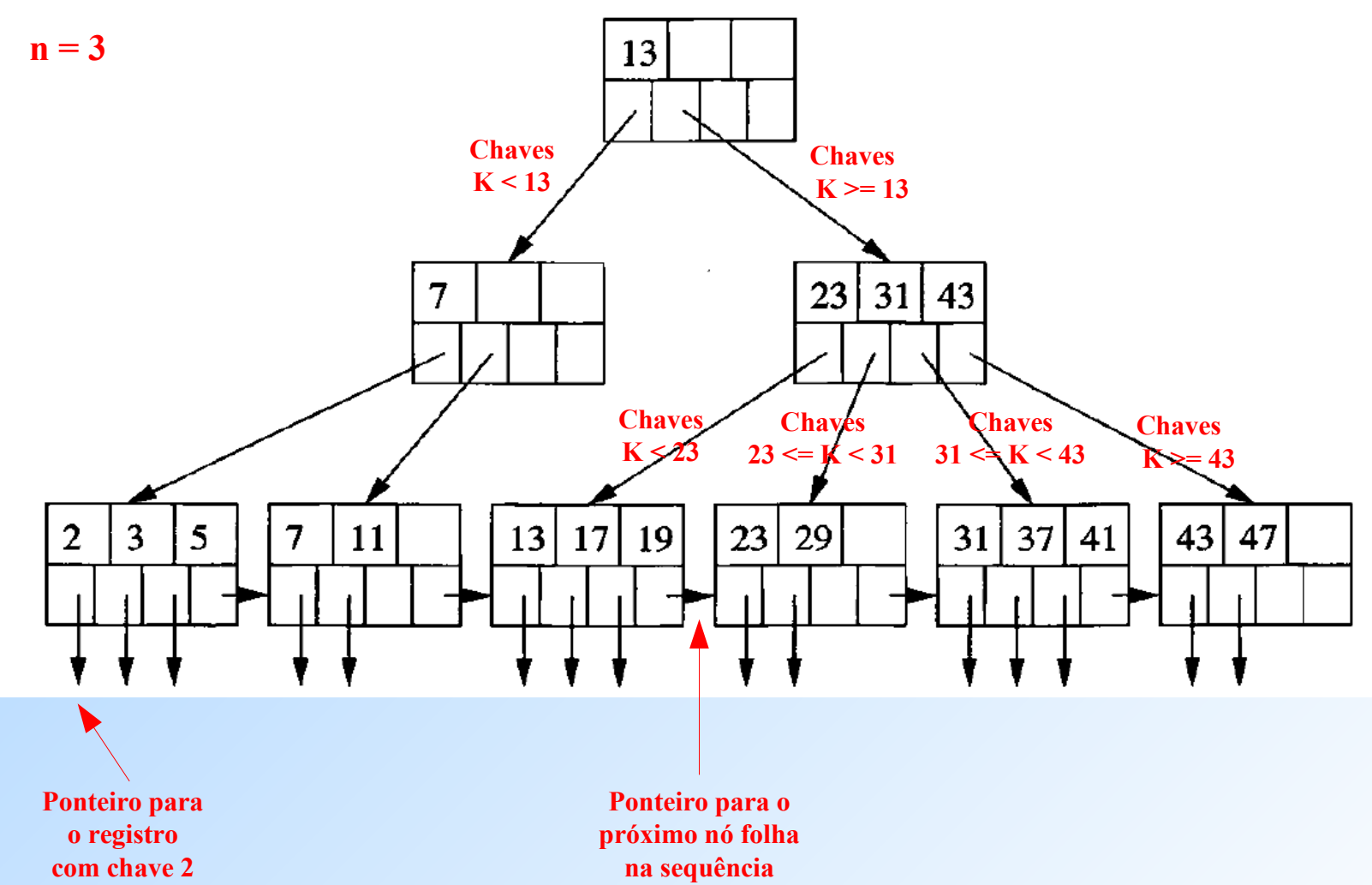
Estruturas de Dados Usadas para Implementar Índices

- Tabela *hash*
  - Tempo de acesso: constante
  - Úteis para condições envolvendo comparações de igualdade
- Árvore balanceada de busca, com nós “gigantes” (uma página inteira do disco)
  - *Árvore B+ (B+ tree)*
  - Tempo de acesso: logarítmico
  - Úteis para condições envolvendo comparações feitas com os operadores **=, >, >=, <, <=**

Árvores B+

- Vimos que um ou dois níveis adicionais no índice ajudam a melhorar o desempenho de consultas
- Para se beneficiar disso de forma mais “plena”, os SGBDs exploram essa ideia por meio de uma estrutura mais geral – as árvores B+
  - As árvores B+ automaticamente mantêm tantos níveis de índice quanto for apropriado para o tamanho do arquivo de dados sendo indexado
  - As árvores B+ gerenciam o espaço usado nos blocos de modo a não precisar de blocos de *overflow*. Todo bloco fica com uma ocupação entre a metade de sua capacidade ou completamente cheio.

Árvore B+


n = 3
13
Chaves
K < 13
Chaves
K >= 13
7
23 31 43
Chaves
K < 23
Chaves
23 <= K < 31
Chaves
31 <= K < 43
Chaves
K >= 43
2 3 5
7 11
13 17 19
23 29
31 37 41
43 47
Ponteiro para
o registro
com chave 2
Ponteiro para o
próximo nó folha
na sequência

Estrutura das Árvores B+

- Uma árvore B organiza seus blocos em um árvore balanceada
  - Todos os caminhos do nó raiz até um nó folha tem o mesmo comprimento
- Há um parâmetro ***n*** associado a toda árvore B+, que determina o leiaute de todos os blocos da árvore. Cada bloco tem:
  - *n* valores de chaves de busca
  - *n+1* ponteiros
- Escolhe-se o maior valor de *n* possível tal que *n+1* ponteiros e *n* chaves caibam em um só bloco

Estrutura das Árvore B+

- As chaves nos nós folhas são cópias das chaves do arquivo de dados
  - As chaves são distribuídas nas folhas ordenadamente, da esquerda para a direita
- No nó raiz, há sempre pelo menos 2 ponteiros em uso
  - Exceção: índice para um arquivo de dados que possui apenas 1 registro
- Numa folha, pelo menos $\lfloor (n+1)/2 \rfloor$ ponteiros devem estar "ocupados" apontando para registros
  - No máximo *n* ponteiros são usados para registros, já que 1 ponteiro é usado para apontar para o nó folha seguinte
- Num nó interno, todos os *n+1* ponteiros podem ser usados para apontar para blocos da árvore que estão num nível inferior. Pelo menos $\lceil (n+1)/2 \rceil$ ponteiros devem estar "ocupados" (se o nó não for a raiz)

Aplicações das Árvores B+

As árvores B+ podem ser usadas para implementar qualquer um dos índices que vimos nesta aula. Exemplos:

- **Índice denso** → chave de busca da árvore B+ = chave primária do arquivo de dados + 1 par chave-ponteiro nas folhas para cada registro no arquivo de dados
  - Arquivo de dados pode ou não estar ordenado pela chave primária
- **Índice primário esparso** → arquivo de dados ordenado por sua chave primária + árvore B+ como índice esparso, com 1 par chave-ponteiro na folhas para cada bloco do arquivo de dados

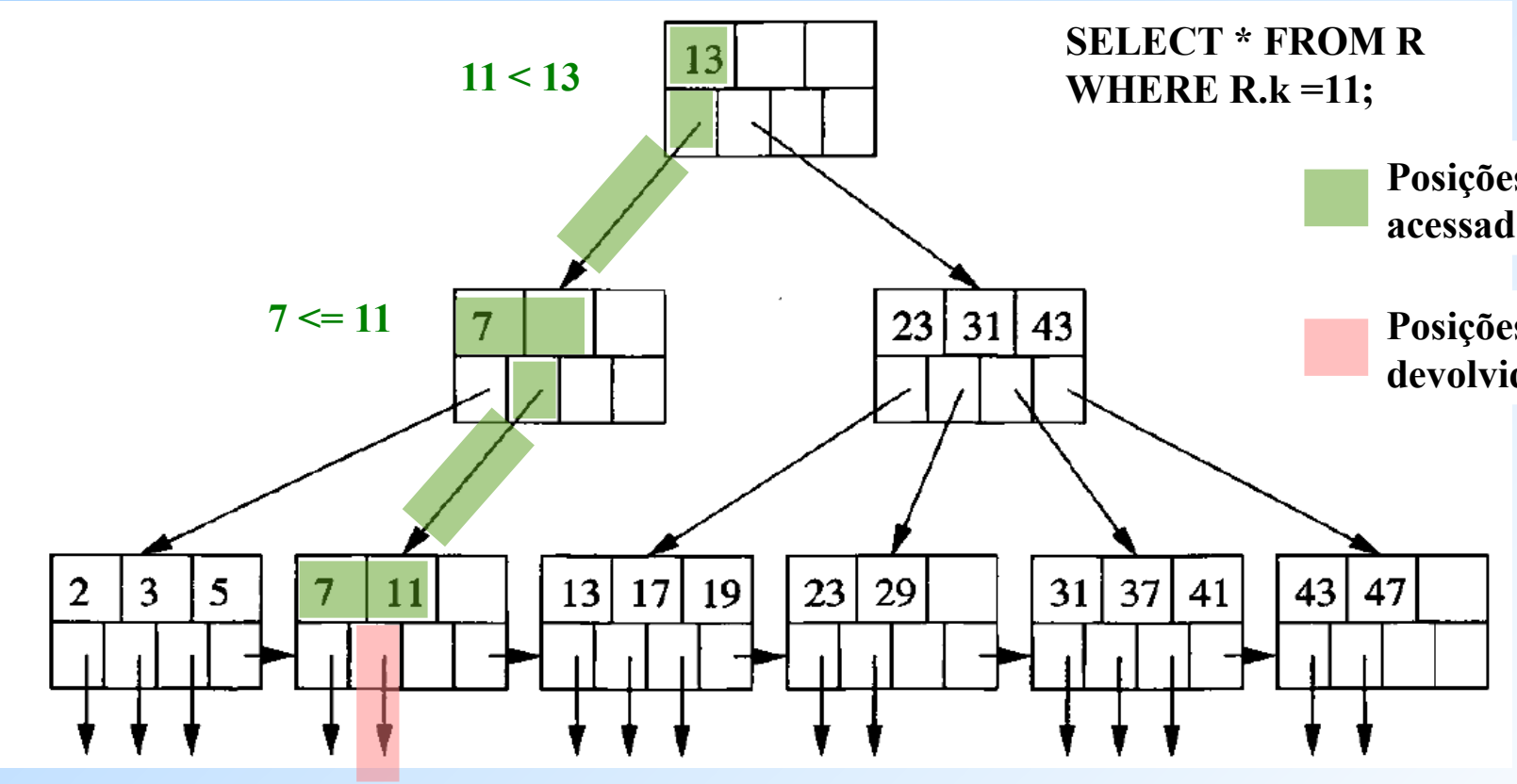
Aplicações das Árvores B+

As árvores B+ podem ser usadas para implementar qualquer um dos índices que vimos nesta aula. Exemplos:

- **Índice para chaves duplicadas** → arquivo de dados ordenado por um atributo que não é chave primária da relação e esse atributo é a chave de busca para a árvore B+. Para cada chave k que aparece no arquivo dos dados, há 1 par chave-ponteiro numa folha. Esse ponteiro aponta para o **primeiro** registro que possui k como valor para a chave de ordenação
  - Note que, embora possa haver chaves de ordenação repetidas no arquivo de dados, não há chaves de busca repetidas nos nós folhas da árvore

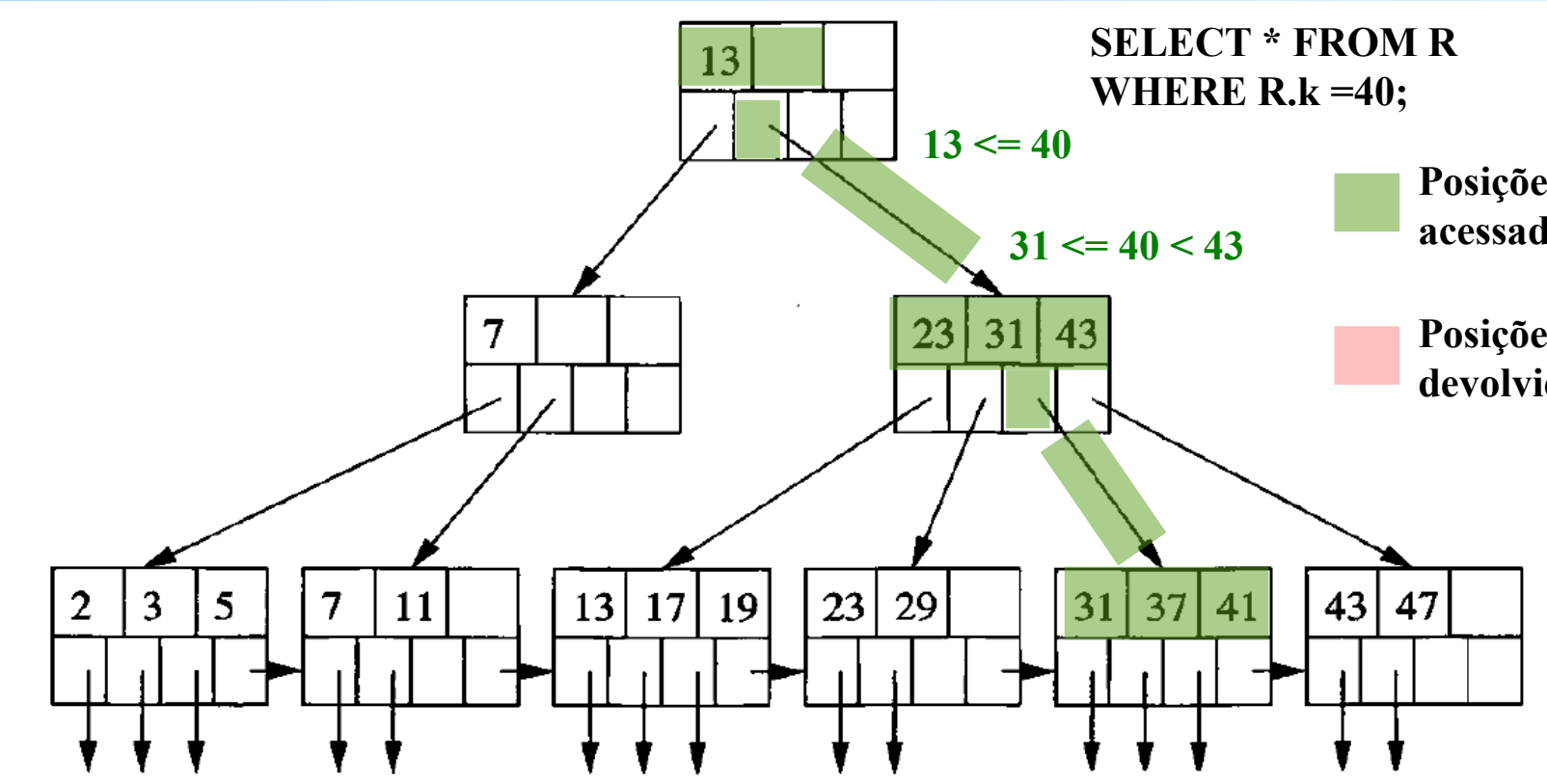
Buscando uma Chave em uma Árvore B+

Suposição: o índice é denso



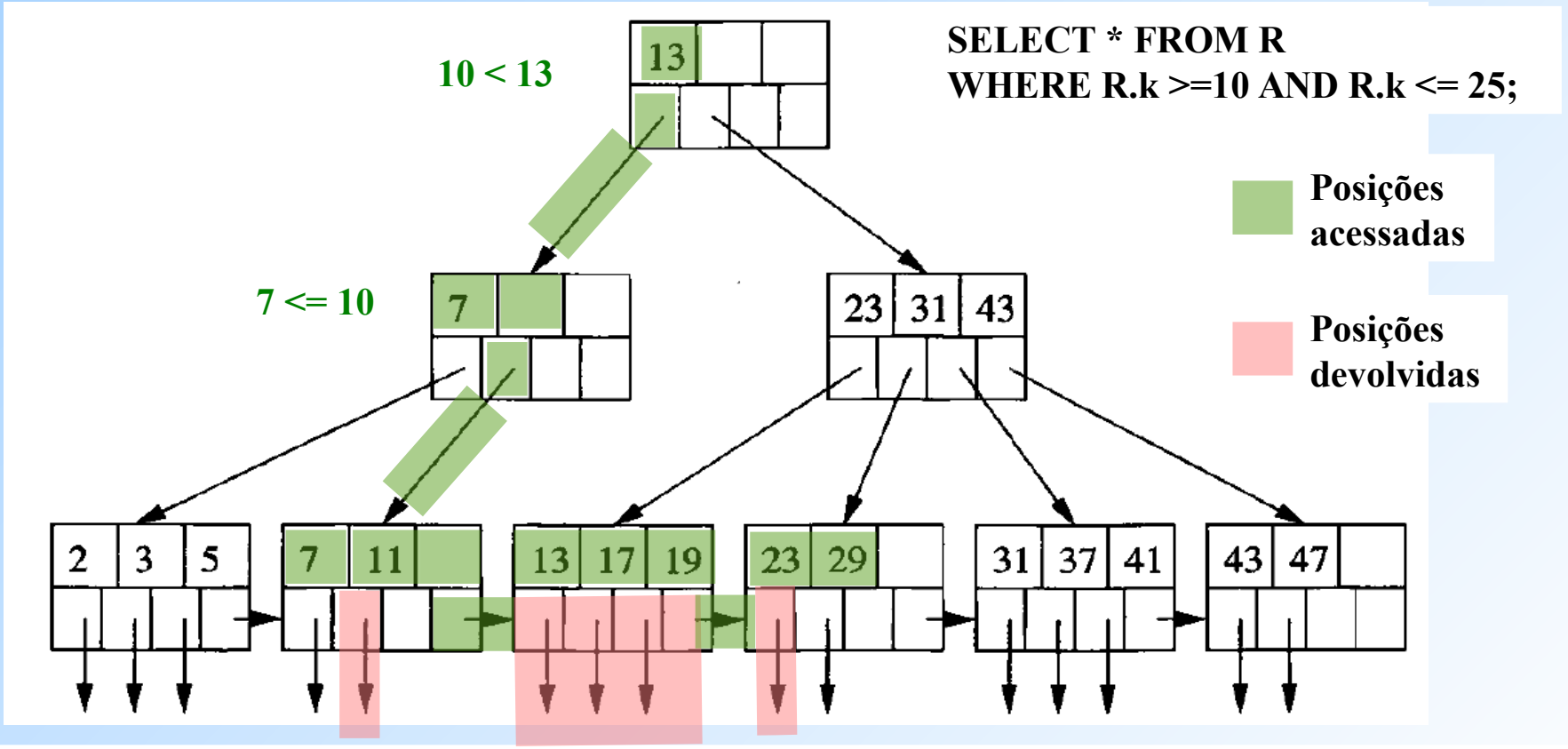
Buscando uma Chave em uma Árvore B+

Suposição: o índice é denso



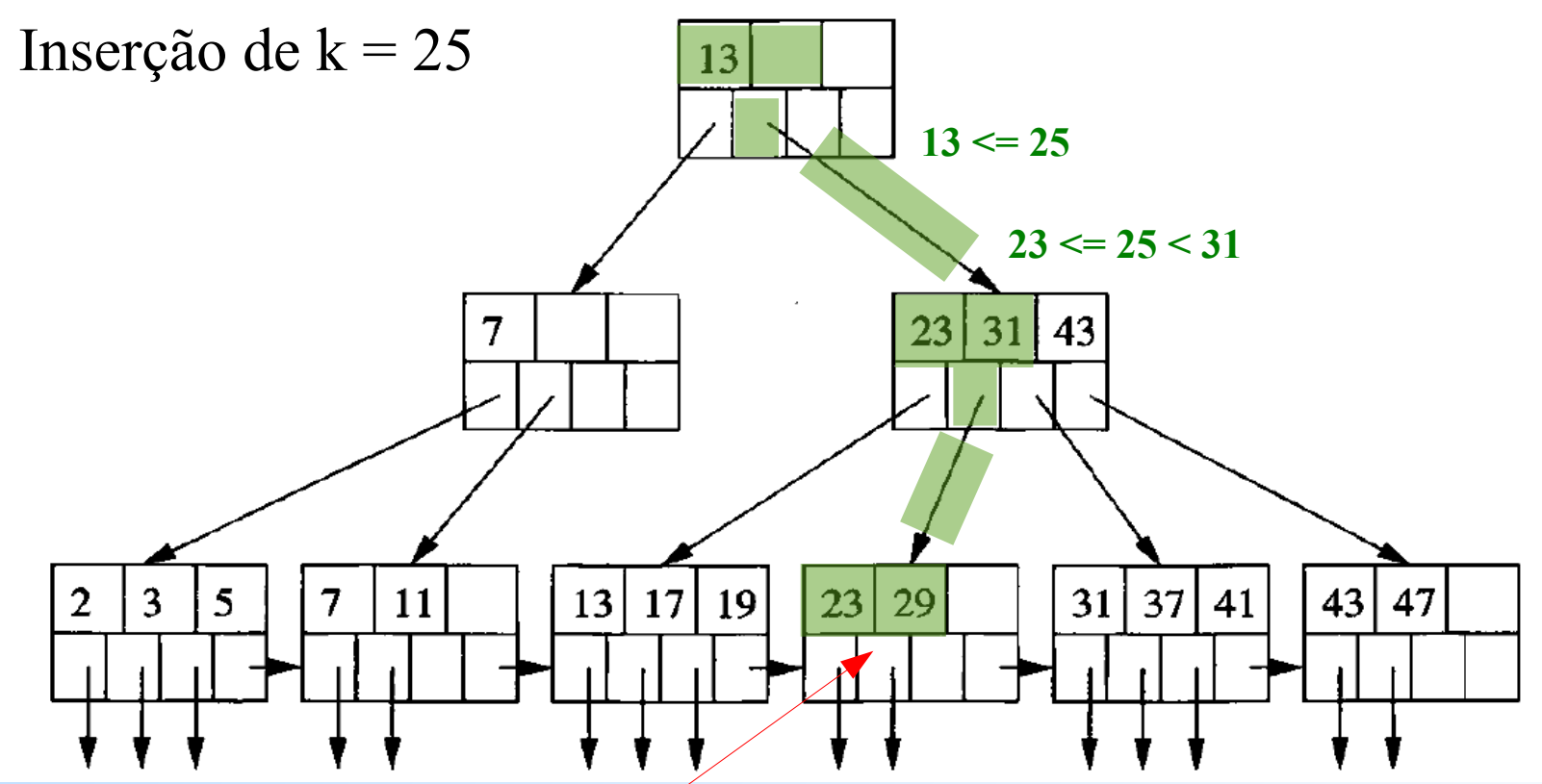
Buscando uma Faixa de Valores em uma Árvore B+

Suposição: o índice é denso



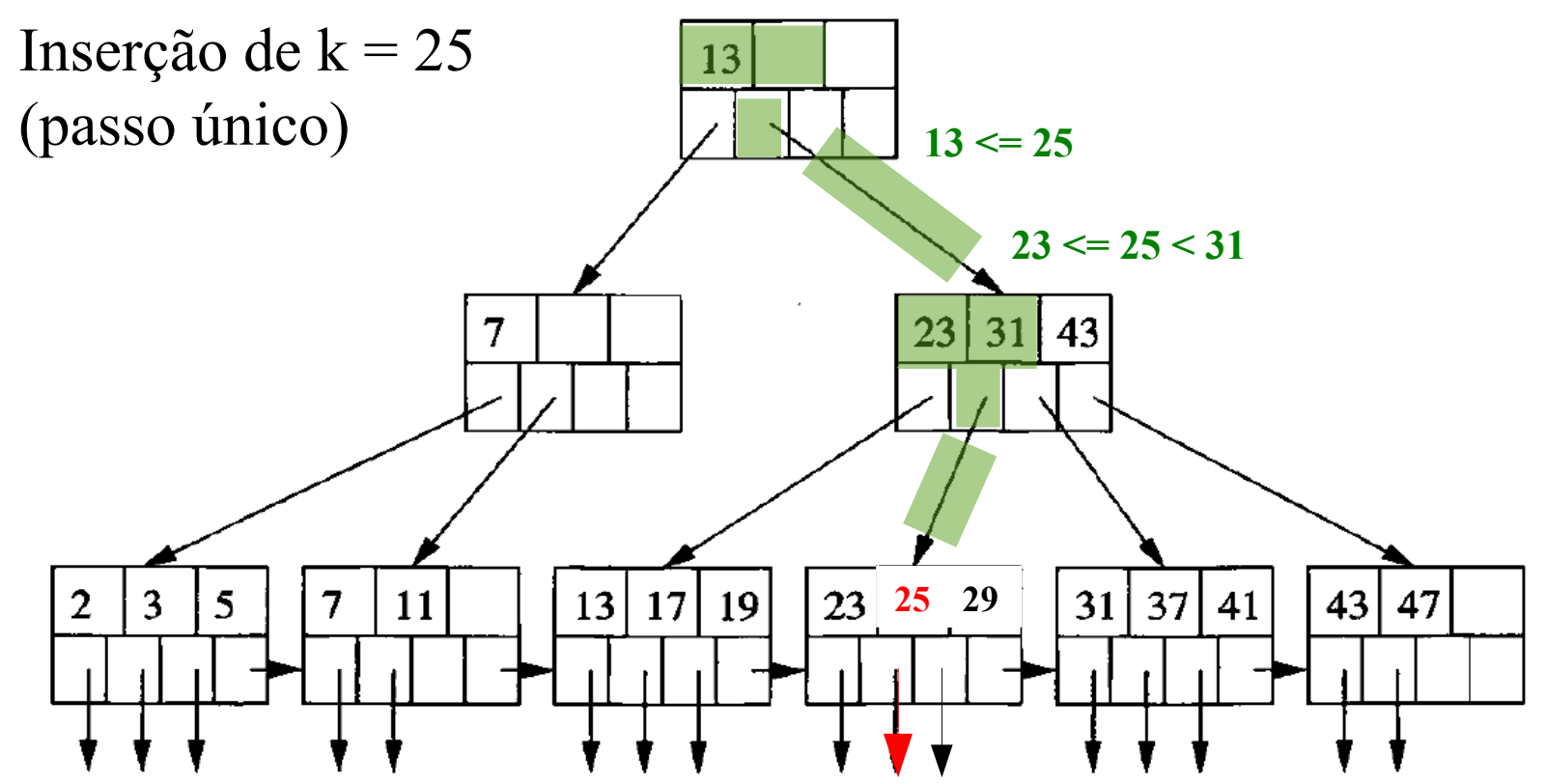
Como 10 não está na folha, então encontramos o primeiro valor maior que ele (11). Depois, segue-se navegando sequencialmente pelas folhas até encontrar o primeiro valor > 25 (no caso, o 29) ou o fim da seq.

Inserção em Árvores B+
Exemplo 1



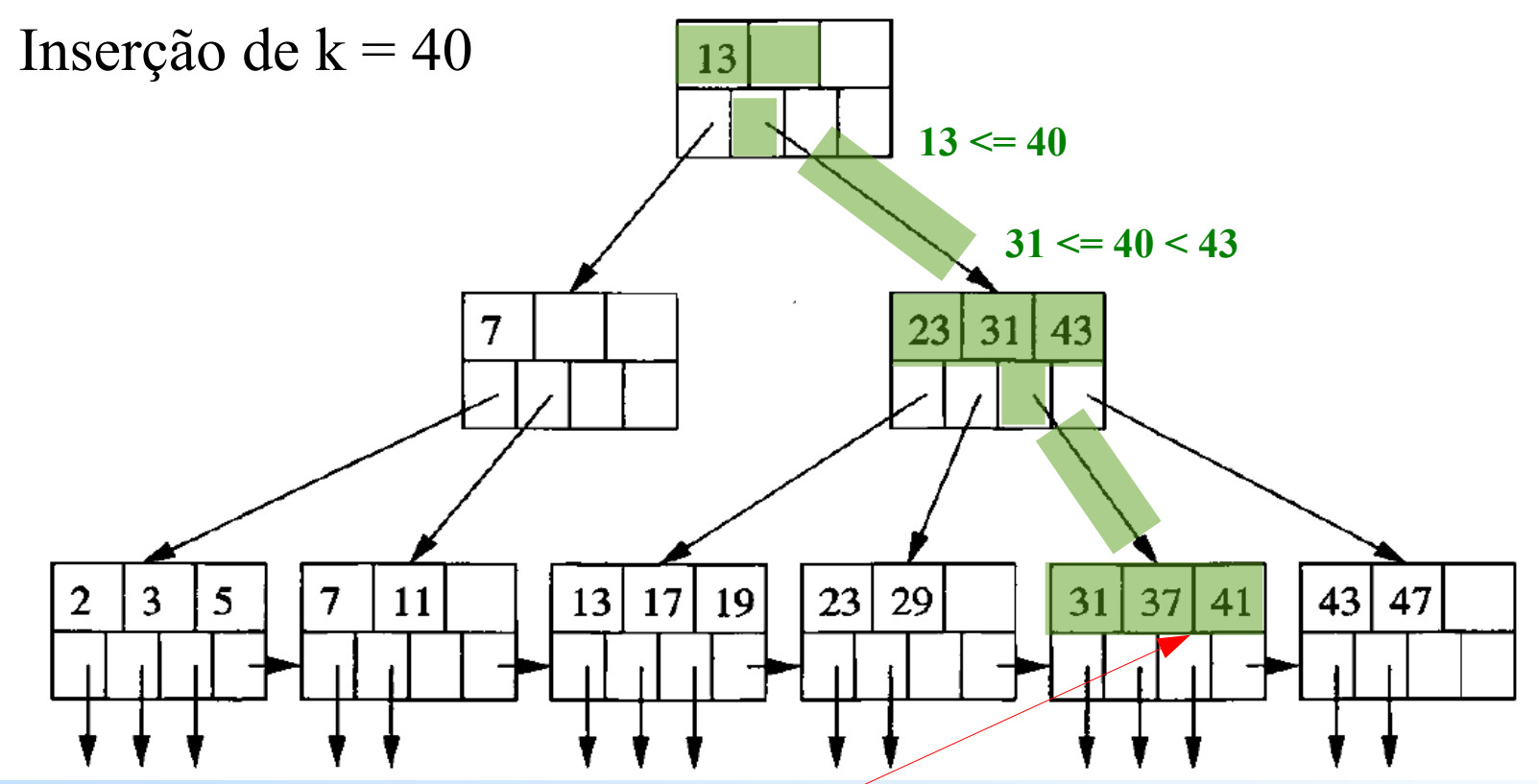
O valor 25 deve ficar entre os valores 23 e 29. Como ainda há espaço livre no nó, basta inserir a nova chave nele, mas mantendo a ordenação.

Inserção em Árvores B+
Exemplo 1



O valor 25 deve ficar entre os valores 23 e 29. Como ainda há espaço livre no nó, basta inserir a nova chave nele, mas mantendo a ordenação.

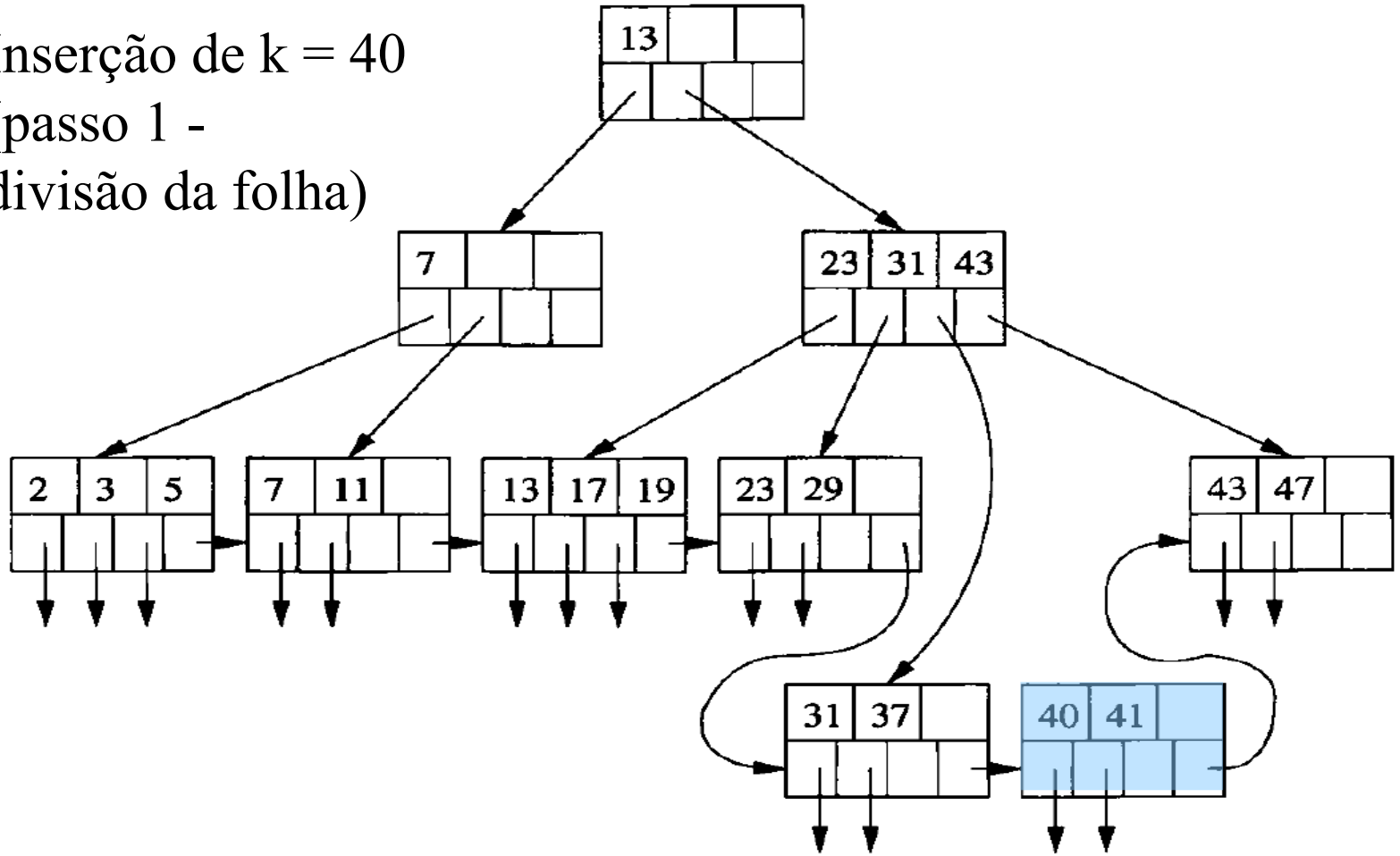
Inserção em Árvores B+ Exemplo 2



O valor 40 deve ficar entre os valores 37 e 41. Como não há mais espaço livre no nó, é preciso "quebrar" o nó em dois e dividir as chaves (inclusive a nova) entre os nós, de modo que cada um fique metade cheio ou com uma chave a mais que isso.

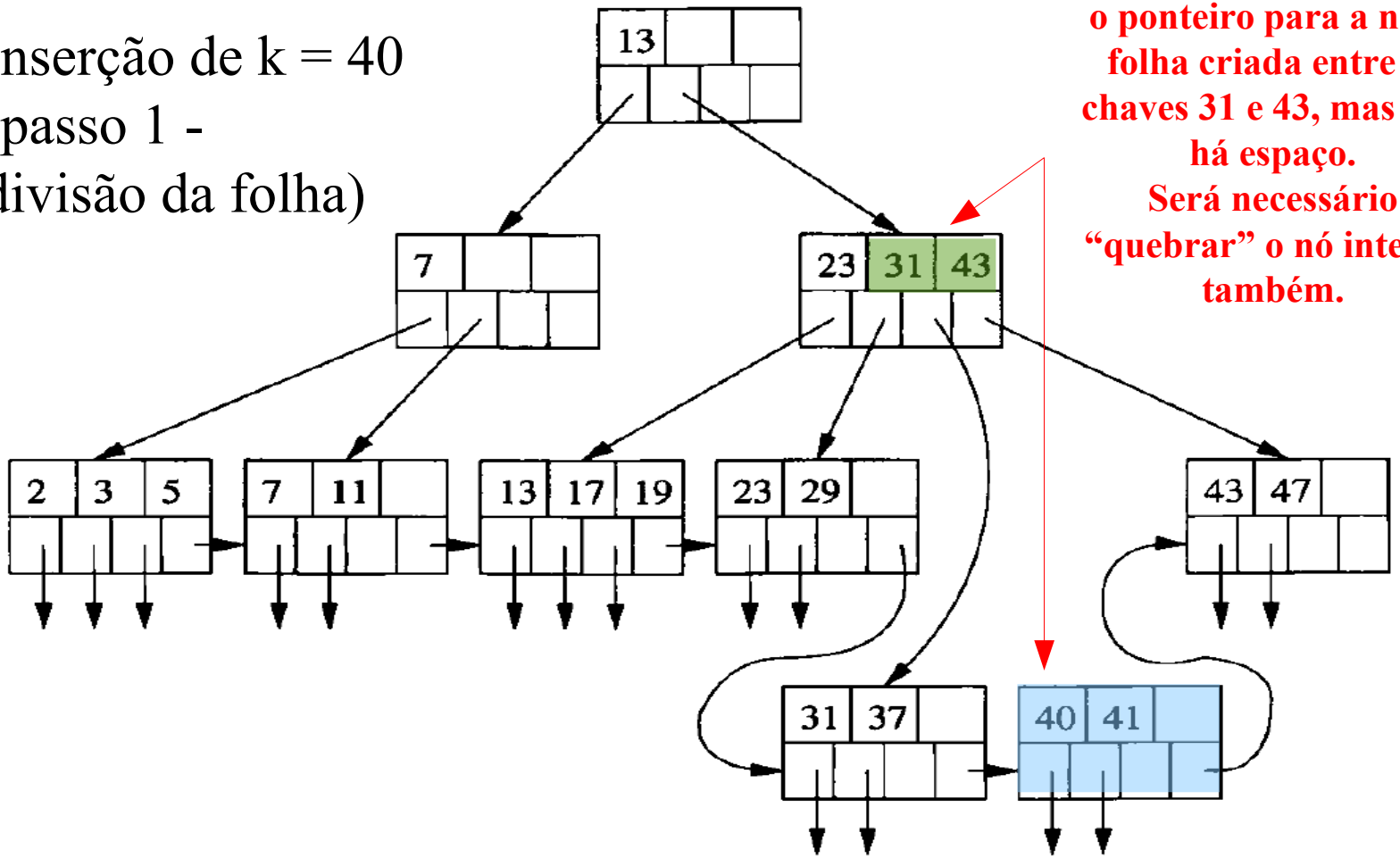
Inserção em Árvores B+ Exemplo 2

Inserção de k = 40
(passo 1 -
divisão da folha)



Inserção em Árvores B+ Exemplo 2

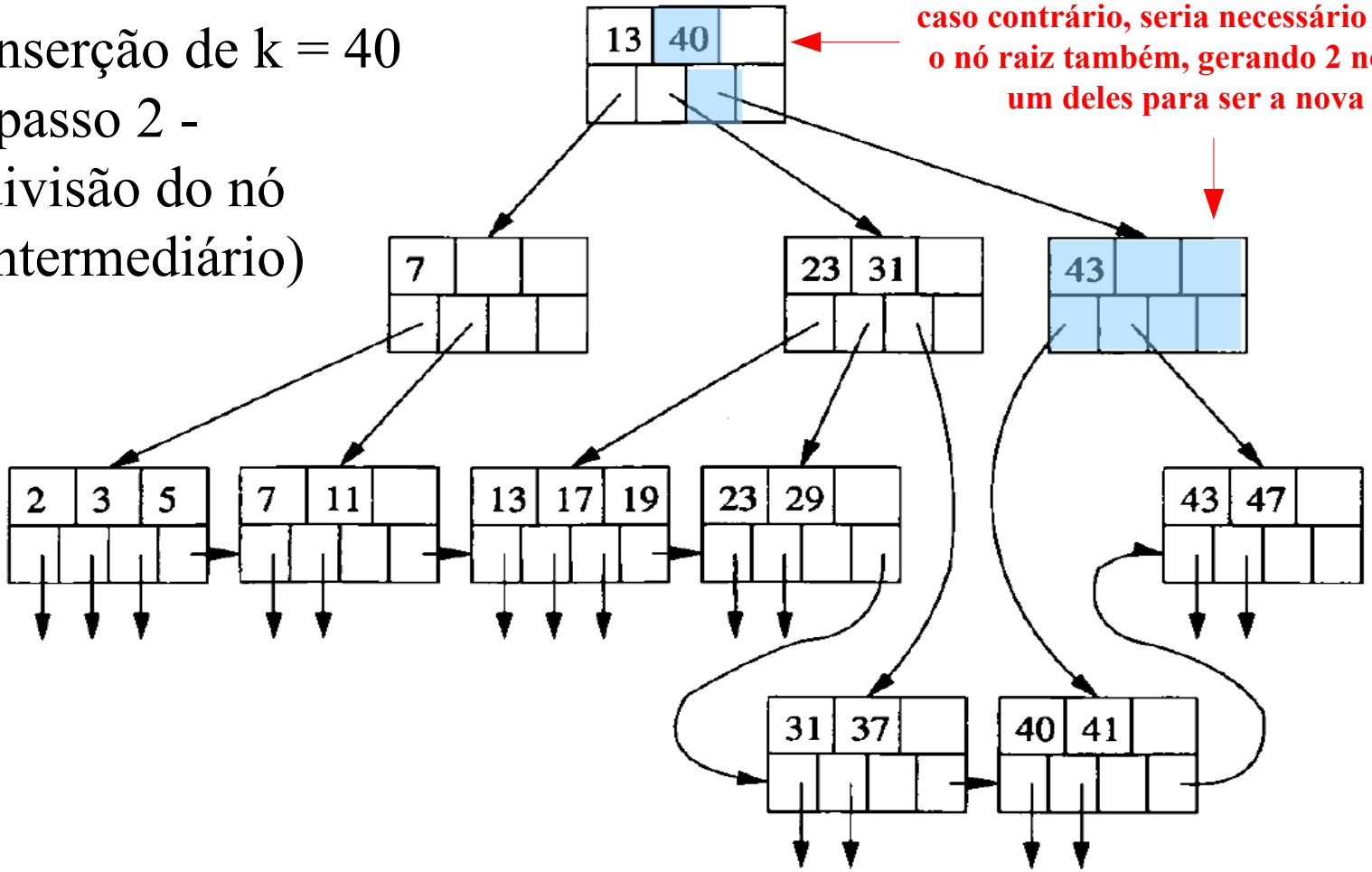
Inserção de k = 40
(passo 1 -
divisão da folha)



Agora é preciso incluir o ponteiro para a nova folha criada entre as chaves 31 e 43, mas não há espaço.
Será necessário "quebrar" o nó interno também.

Inserção em Árvores B+ Exemplo 2

Inserção de k = 40 (passo 2 - divisão do nó intermediário)



Por conta do novo nó interno criado neste passo, é preciso incluir na raiz um novo ponteiro. Como há espaço livre na raiz, a inclusão pode ser feita diretamente. No caso contrário, seria necessário "quebrar" o nó raiz também, gerando 2 novos nós – um deles para ser a nova raiz.

Inserção em Árvores B+ (Resumo)

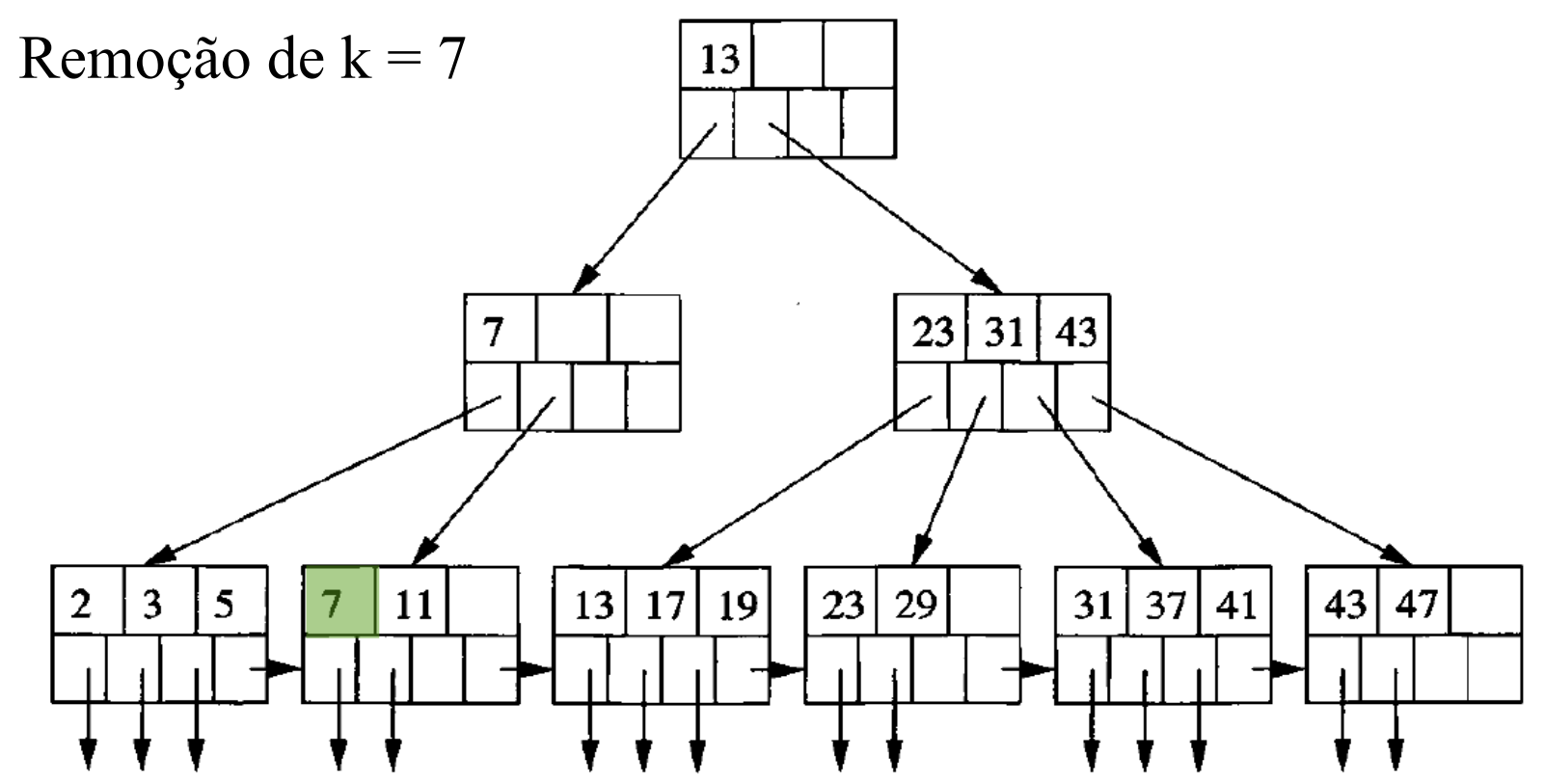
1) Insira a nova chave em um nó folha
   a) Se houver espaço na folha apropriada para a nova chave, insira-a ordenadamente na folha
   b) Senão, separe a folha em duas, dividindo as chaves (inclusive a nova) entre elas
2) A separação de nós em um nível sempre deve ser refletida no nível acima, já que um novo par chave-ponteiro precisa ser inserido num nível superior. Aplique recursivamente a seguinte estratégia para inserir no nível acima:
   a) Se houver espaço no nó interno “pai”, insira o par nele
   b) Senão, separe o nó interno “pai” em dois e continue a inserção árvore acima

Inserção em Árvores B+ (Resumo)

3) Um caso excepcional ocorre quando tentamos inserir um novo par chave-ponteiro na raiz e não há mais espaço livre

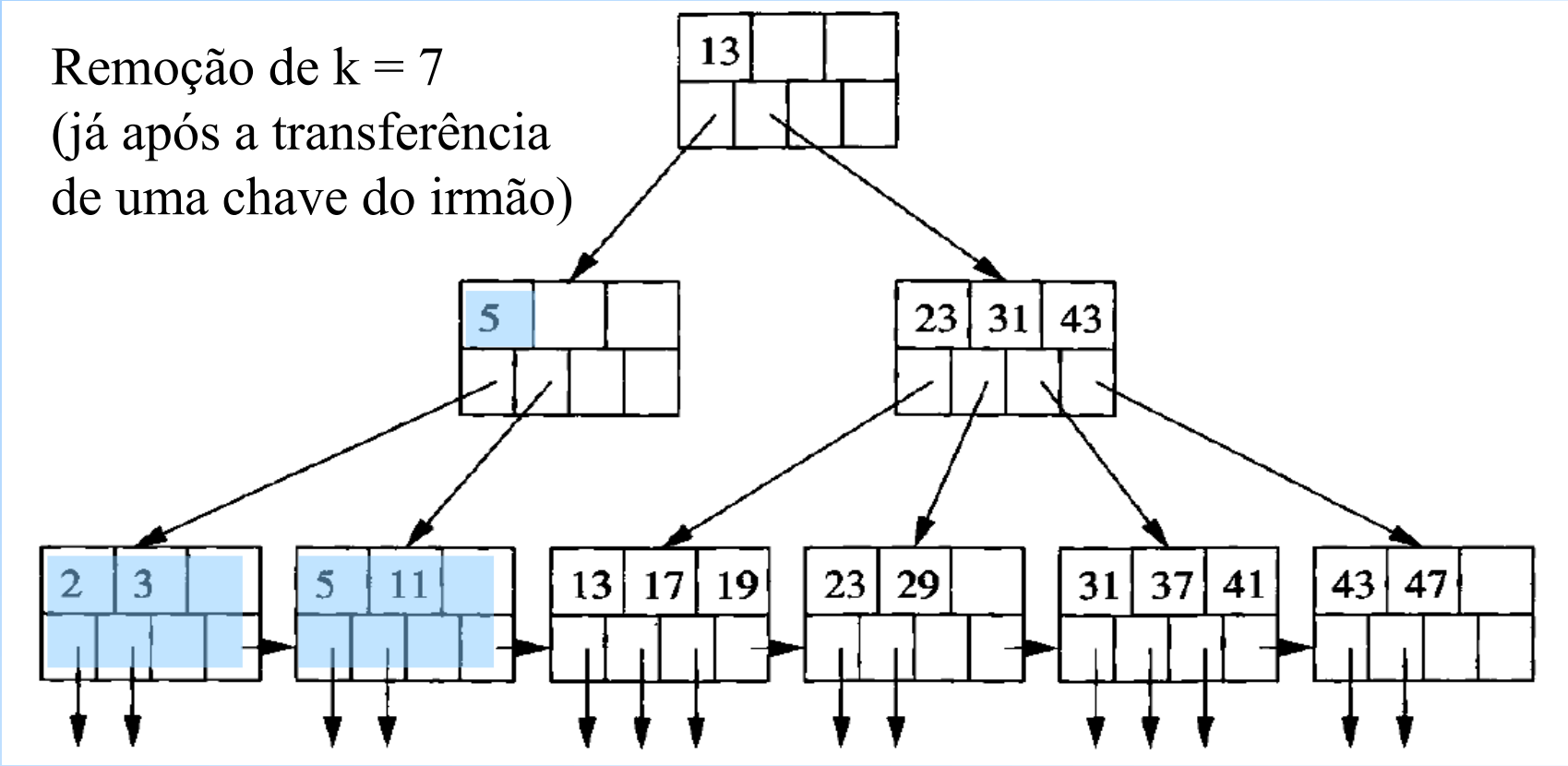
- Nesse caso, é necessário separar a raiz em dois nós e criar uma nova raiz no próximo nível superior. A nova raiz terá como filhos os dois nós resultantes da separação
- Lembre-se de que, não importa o tamanho *n*, sempre é permitido que a raiz tenha uma só chave e dois ponteiros.

Remoção em Árvores B+ Exemplo 1



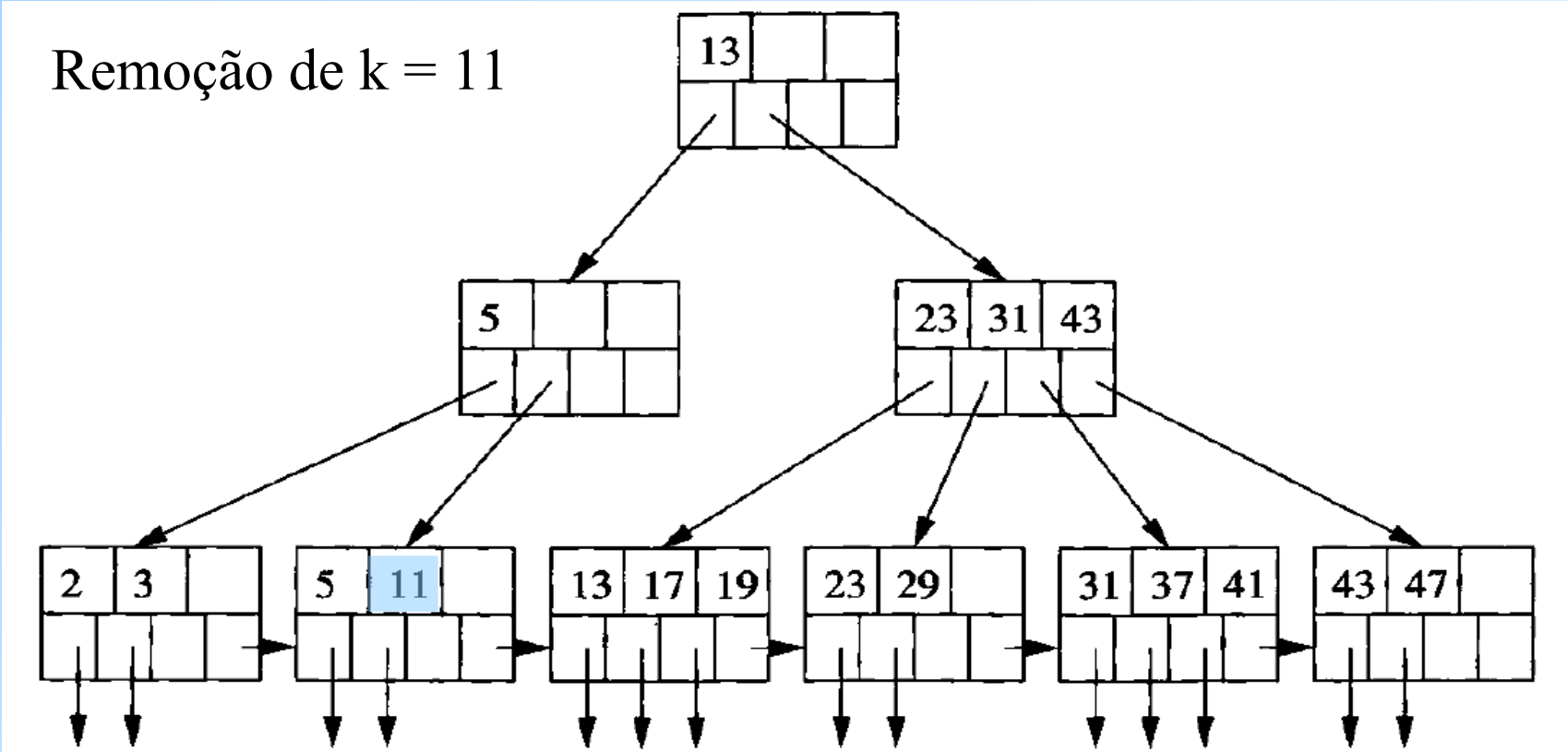
A remoção da chave 7 do nó folha onde se encontra deixará o nó com uma quantidade de ponteiros sub-mínima (< $\lfloor (n+1)/2 \rfloor$). Mas como um nó irmão seu tem ponteiros "sobrando" (> $\lfloor (n+1)/2 \rfloor$) , podemos passar uma das chaves desse nó irmão para o nó de onde o 7 será removido, mantendo a ordenação das chaves intacta nos nós folhas.

Remoção em Árvores B+ Exemplo 1



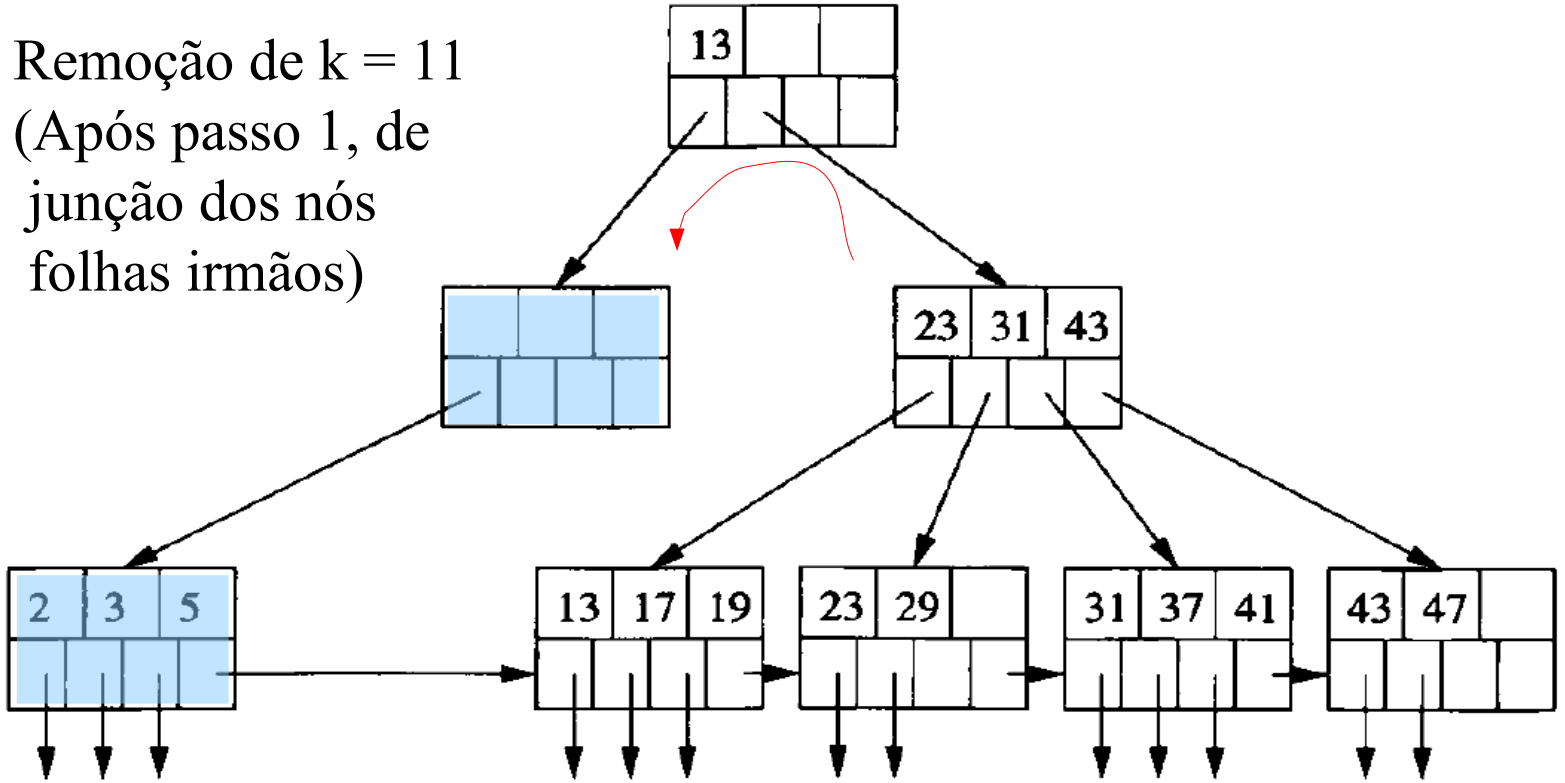
A chave 5 foi transferida do irmão (à esquerda) do nó folha onde se encontrava 7. Essa transferência só foi possível porque mesmo sem essa chave a quantidade de ponteiros no nó irmão continua >=$\lceil (n+1)/2 \rceil$. Observe que (como ocorreu no exemplo), às vezes é preciso ajustar as chaves do nó pai dos blocos modificados por conta do remoção.

Remoção em Árvores B+ Exemplo 2



Problema: o nó folha onde 11 está não possui um irmão que possa transferir uma chave para ele após a remoção do 11. O irmão à esquerda possui a quantidade mínima de ponteiros em uso. E o nó de 11 não possui irmão à direita (o nó folha à direita dele não é irmão porque tem um pai diferente!).
Solução: as três chaves que sobram nos dois primeiros nós folhas após a remoção de 11 caberiam em um só nó. Então podemos mover a chave 5 para o primeiro nó e remover o segundo nó.

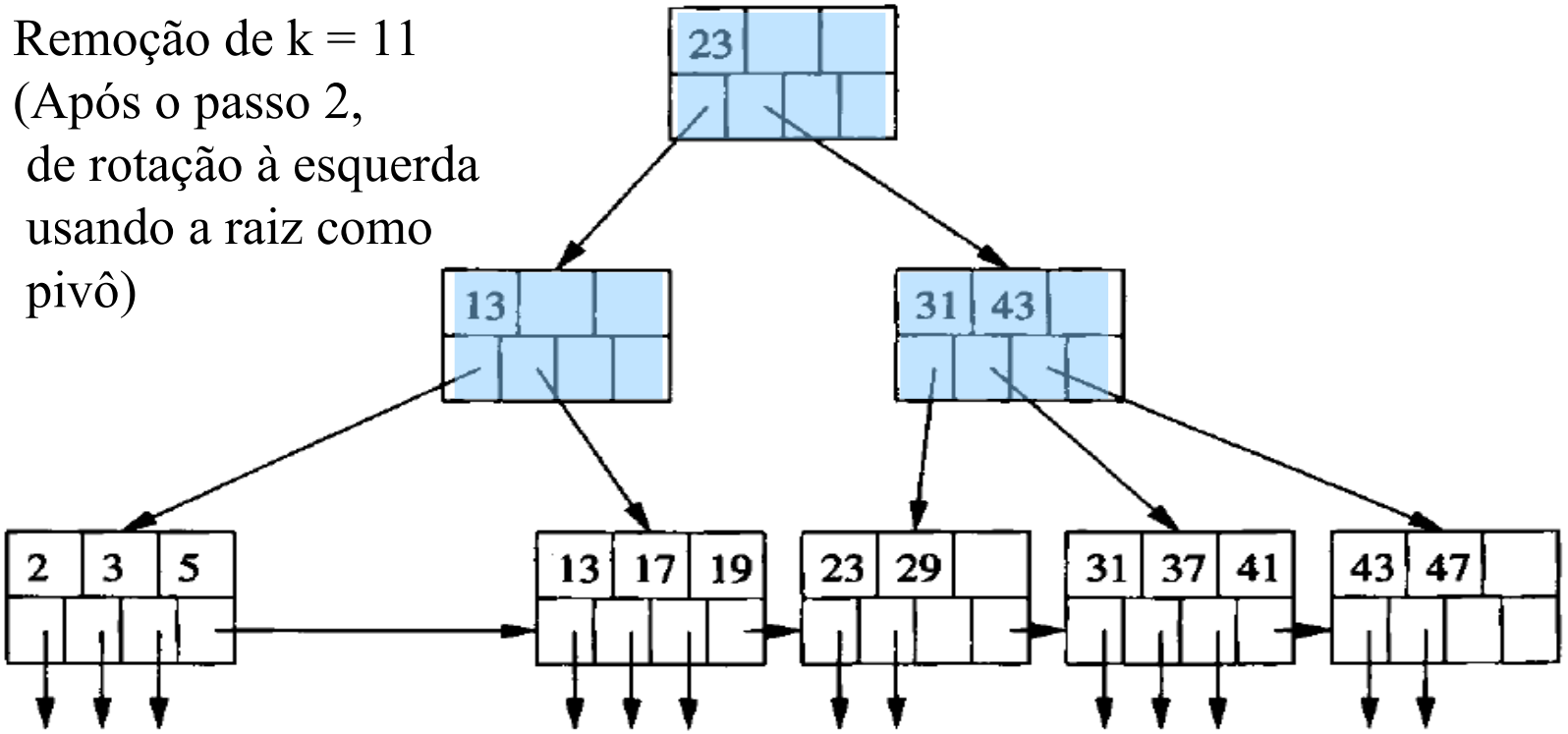
Remoção em Árvores B+ Exemplo 2



Novo problema: a junção dos nós folhas irmãos fez com que o nó pai deles ficasse sem nenhuma chave e 1 só ponteiro (pois antes o pai tinha somente dois filhos).
Solução: nesse caso do exemplo, é possível obter uma chave e um ponteiro do nó irmão à direita (que tem ponteiros "sobrando") → **balanceamento por rotação à esquerda**

Remoção em Árvores B+ Exemplo 2

Remoção de k = 11
(Após o passo 2,
de rotação à esquerda
usando a raiz como
pivô)



Eficiência das Árvores B+

- As árvores B+ possibilitam a realização de buscas, inserção e remoção de registros usando **bem poucos acessos ao disco por cada operação sobre o arquivo de dados**
- Se *n* é grande (= o número de chaves por bloco é grande), o número de eventos que causarão separações ou junções de blocos serão raros
  - Além disso, quando operações dessas são necessárias, elas se limitam quase sempre aos nós folhas, de modo que apenas 2 nós folhas irmãos e o seu nó pai sejam afetados.
  - Por isso, **o custo (em termos de acesso a disco) da reorganização de um índice árvore B+ pode ser desconsiderado**

Eficiência das Árvores B+

- Cada busca por registro(s) com uma dada chave requer que naveguemos do nó raiz até um nó folha da árvore
- O número de acessos ao disco (= leitura de blocos) em uma operação sobre um registro é dado por:

  número de níveis da árvore +

  número de acessos necessários para a manipulação do registro, que é
  - 1, no caso de uma leitura de registro
  - 2, no caso de uma modificação (inserção, alteração ou remoção)
- **Quantos níveis uma árvore B costuma ter?**
  - Para tamanhos de chaves, ponteiros e blocos típicos, **3 níveis são suficientes até mesmo para grandes bancos de dados!**

Uma Ilustração para Justificar os 3 Níveis

- Suponha que:
  - Um bloco tem 4096 bytes
  - Uma chave é um inteiro de 4 bytes
  - Um ponteiro tem 8 bytes
- Para encontrar o melhor valor de *n* para os nós da árvore B+, fazemos:

  $4n + 8(n+1) <= 4096 \rightarrow n=340$
- Suponha que um bloco médio da árvore tenha uma ocupação que fica entre o mínimo e o máximo, ou seja, um bloco típico tem 255 ponteiros.
- De uma raiz, temos 255 filhos e 255 * 255 = 65025 folhas. E essas folhas têm um total de 255 * 255 * 255 ponteiros para registros
  - **Portanto, arquivos de dados com cerca de 16,6 milhões registros podem ser indexados por uma árvore B+ de apenas 3 níveis.**

Referências Bibliográficas

- Sobre estruturas de índices:

  Capítulo 14 do livro “Database Systems – The Complete Book” (2ª edição), Garcia-Molina, Ullman e Widom
- Para mais detalhes sobre gerenciamento de armazenamento secundário, ler também:

  Capítulo 13 do livro “Database Systems – The Complete Book” (2ª edição), Garcia-Molina, Ullman e Widom