

Grupo ARCOS

**uc3m** | Universidad **Carlos III** de Madrid

# Tema 5: Jerarquía de Memoria (II)

## **Estructura de Computadores**

Grado en Ingeniería Informática

Grado en Matemática aplicada y Computación

Doble Grado en Ingeniería Informática y Administración de Empresas

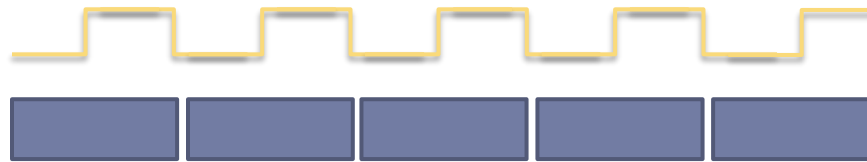


# Contenidos

1. Tipos de memoria
2. Jerarquía de memoria
3. Memoria principal
4. Memoria caché
  1. Introducción
  2. Estructura de la memoria caché
  3. Diseño y organización de la memoria caché
5. Memoria virtual

# Característica de la memoria principal

- ▶ Se premia el acceso a posiciones consecutivas de memoria
- ▶ Ejemplo 1: acceder a 5 posiciones de memoria **individuales no consecutivas**



- ▶ Ejemplo 2: acceder a 5 posiciones de memoria **consecutivas**



# Característica de los accesos a memoria

## ► “Principio de proximidad o localidad de referencias”:

Durante la ejecución de un programa,  
las referencias (direcciones) a memoria tienden a estar  
agrupadas por:

- **proximidad espacial**
  - Secuencia de instrucciones
  - Acceso secuencial a arrays
- **proximidad temporal**
  - Bucles

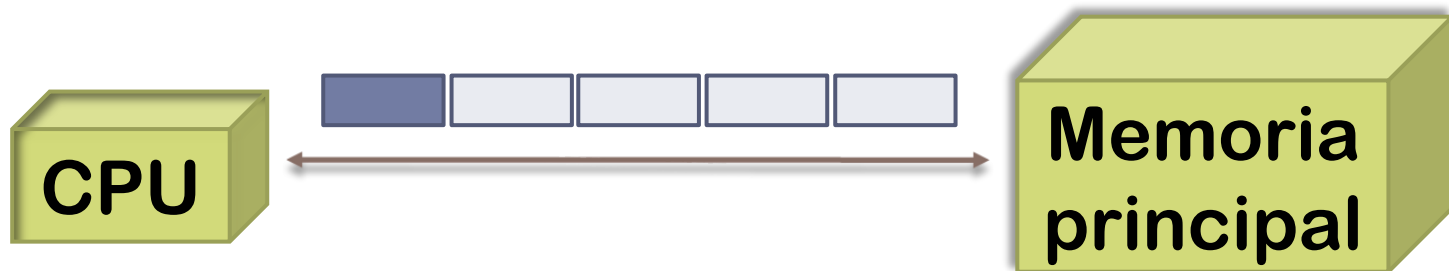
```
.data
vector: .space 4*1024

.text
main:  li  t0 0
      la  t1 vector
      li  t3 1024
      li  t4 4
b2:    bge t0 t3 fb2
      mul t2 t0 t4
      add t2 t1 t2
      sw  t0 0(t2)
      addi t0 t0 1
      j   b2
fb2:   jr  ra
```

# Objetivo de la memoria caché:

aprovechar los accesos contiguos

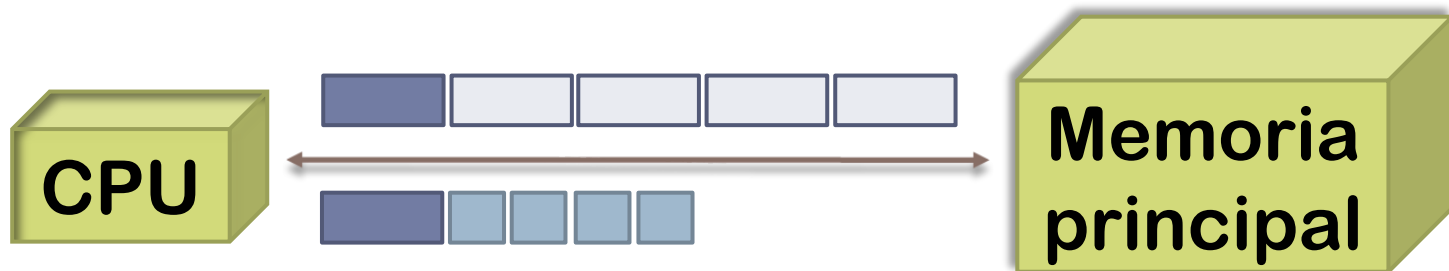
- ▶ Si cuando se accede a una posición de memoria solo se transfieren los datos de esa posición, no se aprovecha los posibles accesos a datos contiguos.



# Objetivo de la memoria caché:

aprovechar los accesos contiguos

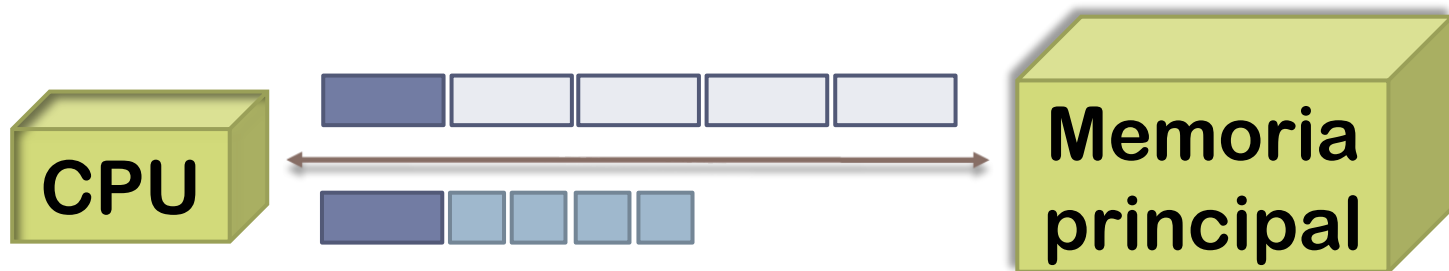
- ▶ Si cuando se accede a una posición de memoria se transfiere esos datos y los contiguos, sí se aprovecha el acceso a datos contiguos



# Objetivo de la memoria caché:

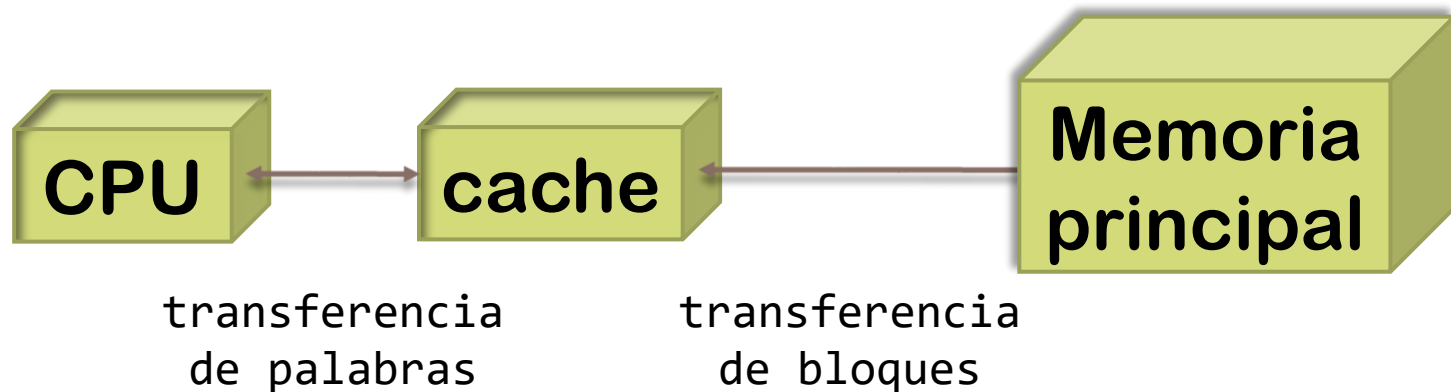
aprovechar los accesos contiguos

- ▶ Si cuando se accede a una posición de memoria se transfiere esos datos y los contiguos, sí se aprovecha el acceso a datos contiguos
  - ▶ Transfiero de la memoria principal un bloque de palabras
  - ▶ ¿Dónde se almacenan las palabras del bloque?



# Memoria Cache

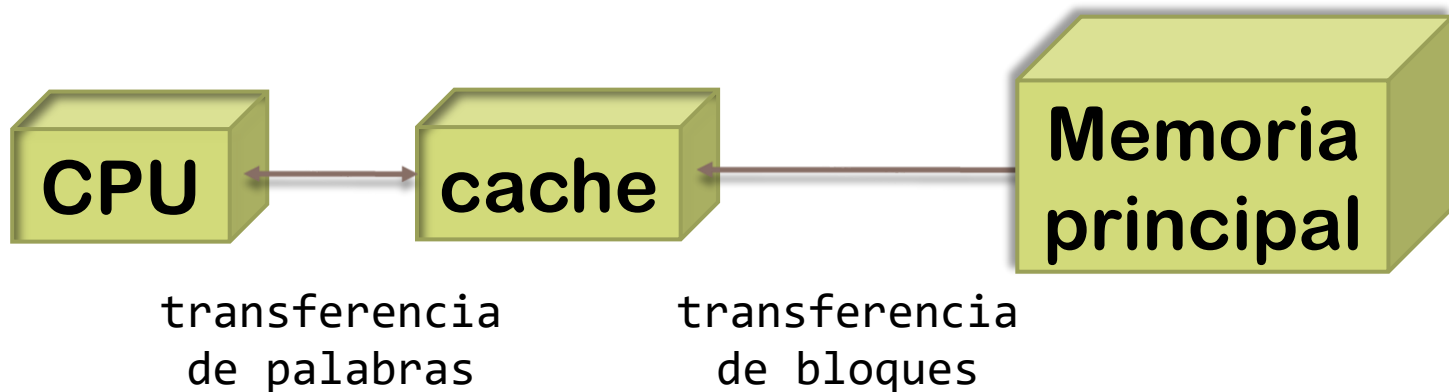
- ▶ Cantidad pequeña de memoria rápida SRAM
  - ▶ Más rápida y cara que la memoria principal DRAM
- ▶ Está **entre** la **memoria principal** y el **procesador** (CPU)
  - ▶ Integrada en el mismo procesador normalmente
- ▶ Almacena una **copia** de partes de la memoria principal





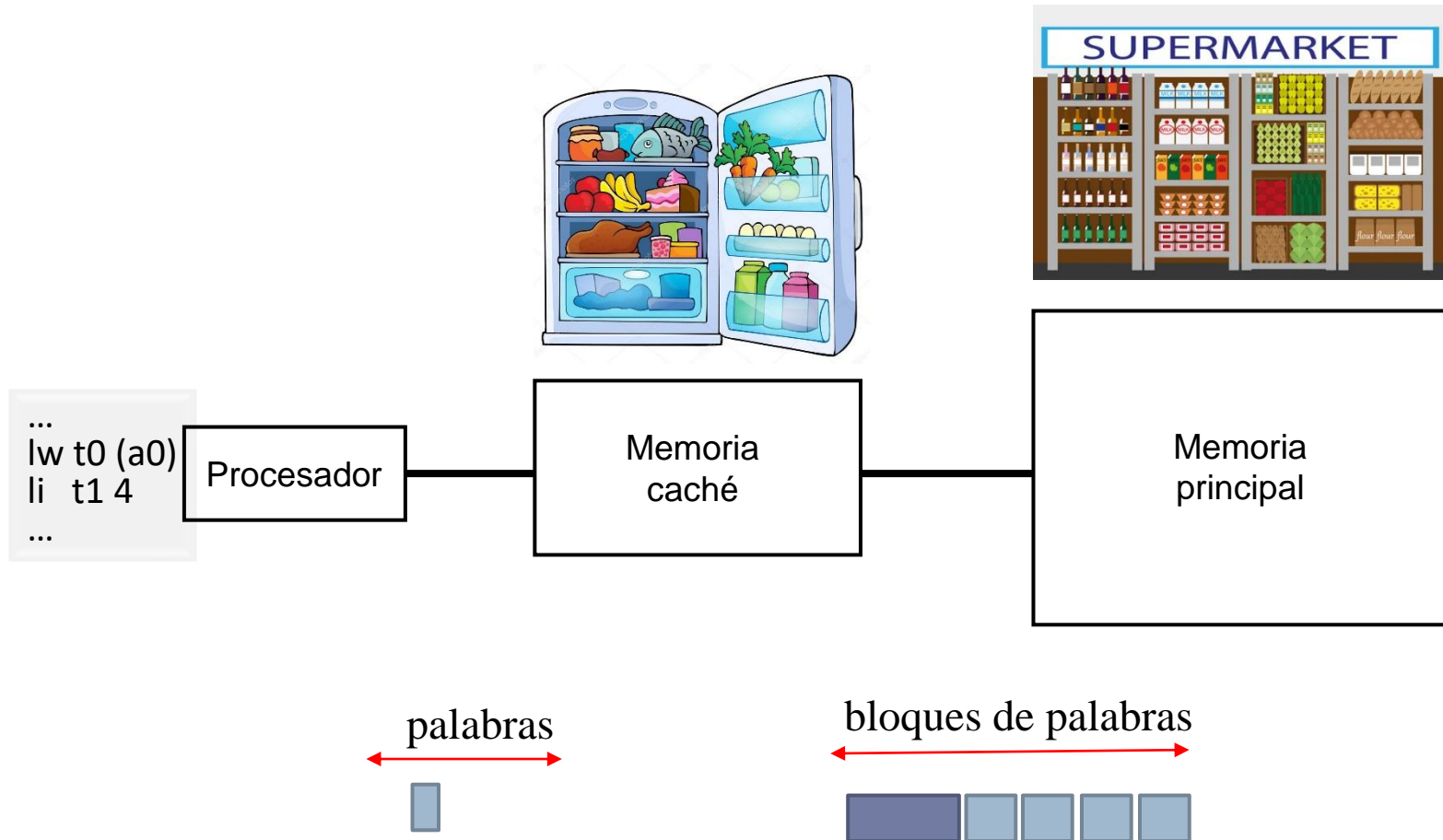
# Ejemplo de tiempos de acceso

- ▶ Memoria principal (DRAM o similar)
  - ▶ Tiempo de acceso: entre 20 y 50 ns.
- ▶ Memoria caché (SRAM o similar)
  - ▶ Tiempo de acceso: entre 1 y 2.5 ns.



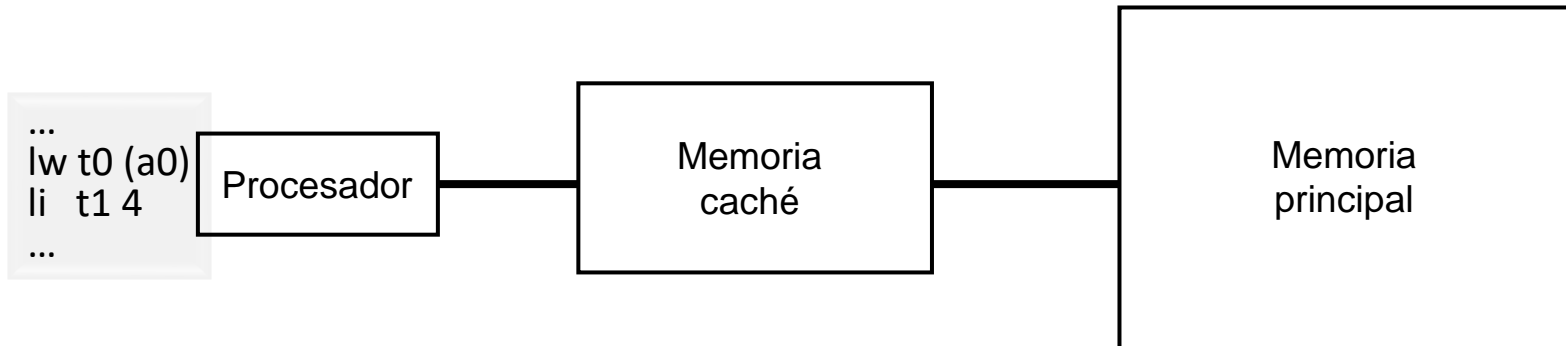
# Memoria caché

metáfora de supermercado y el frigorífico



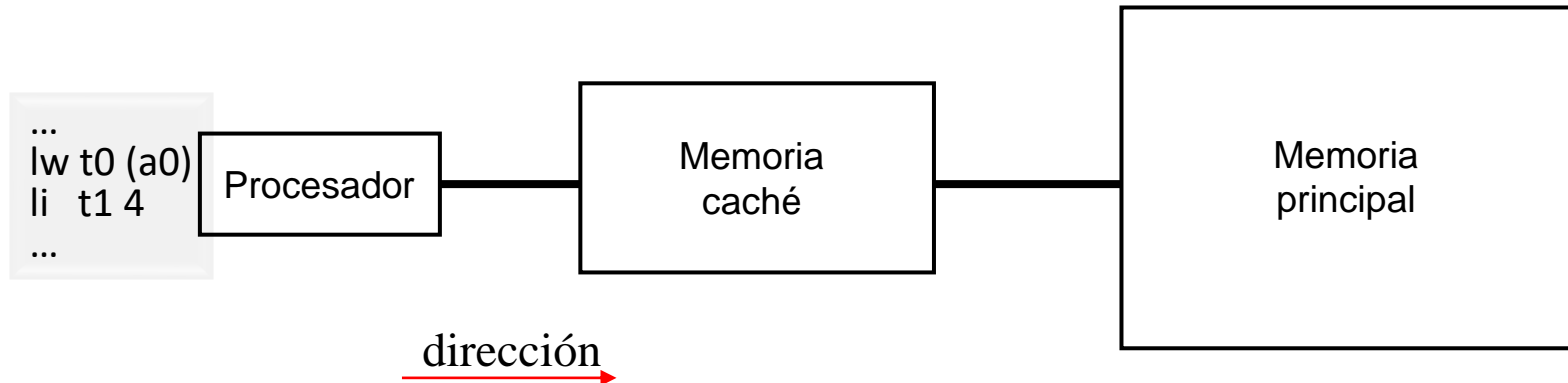
# Funcionamiento de la memoria cache

1. El procesador solicita contenidos de una posición de memoria.
2. La cache comprueba si ya están los datos de esta posición:
  - ▶ Si está (**ACIERTO**)
    - 3.A.1 Se la sirve al procesador desde la cache (rápidamente).
  - ▶ Si no está (**FALLO**)
    - 3.B.1 La cache transfiere de memoria principal el bloque asociado a la posición.
    - 3.B.2 Después, la cache entrega los datos pedidos al procesador.



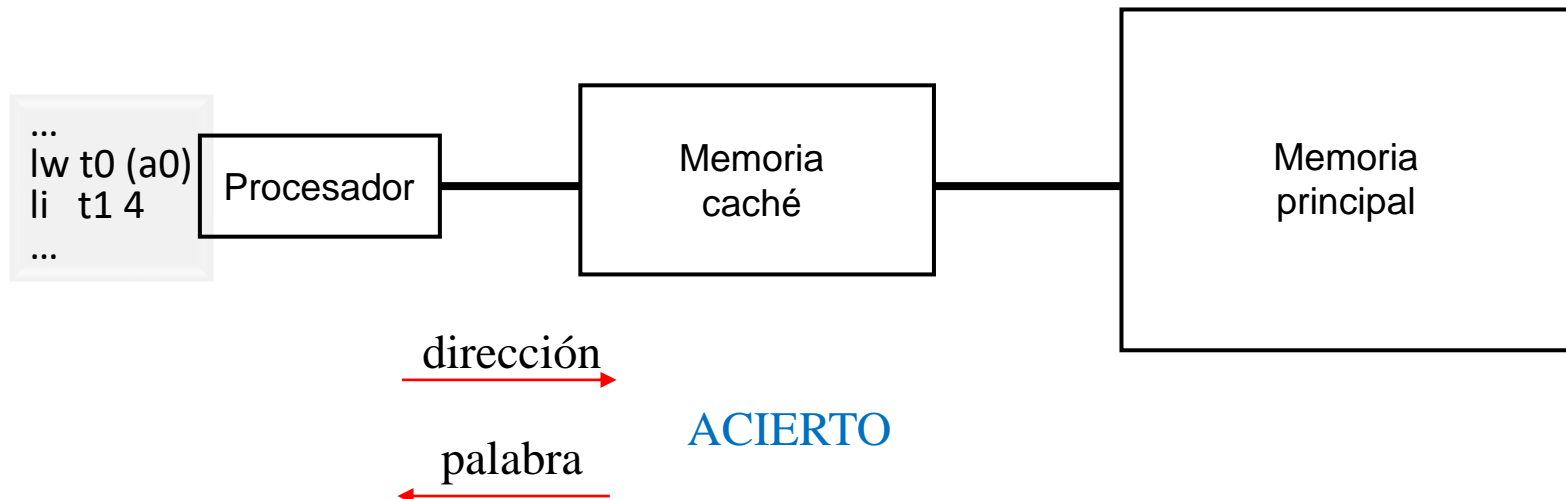
# Funcionamiento de la memoria cache

1. El procesador solicita contenidos de una posición de memoria.
2. La cache comprueba si ya están los datos de esta posición:
  - ▶ Si está (ACIERTO)
    - 3.A.1 Se la sirve al procesador desde la cache (rápidamente).
  - ▶ Si no está (FALLO)
    - 3.B.1 La cache transfiere de memoria principal el bloque asociado a la posición.
    - 3.B.2 Después, la cache entrega los datos pedidos al procesador.



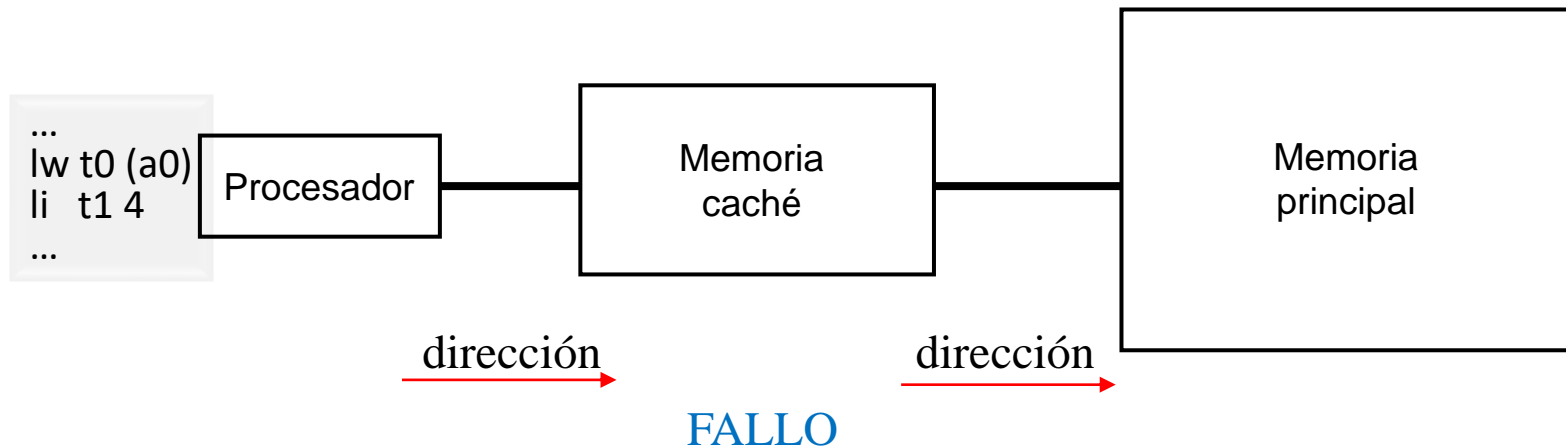
# Funcionamiento de la memoria cache

1. El procesador solicita contenidos de una posición de memoria.
2. La cache comprueba si ya están los datos de esta posición:
  - ▶ **Si está (ACIERTO)**
    - 3.A.1 Se la sirve al procesador desde la cache (rápidamente).
  - ▶ **Si no está (FALLO)**
    - 3.B.1 La cache transfiere de memoria principal el bloque asociado a la posición.
    - 3.B.2 Después, la cache entrega los datos pedidos al procesador.



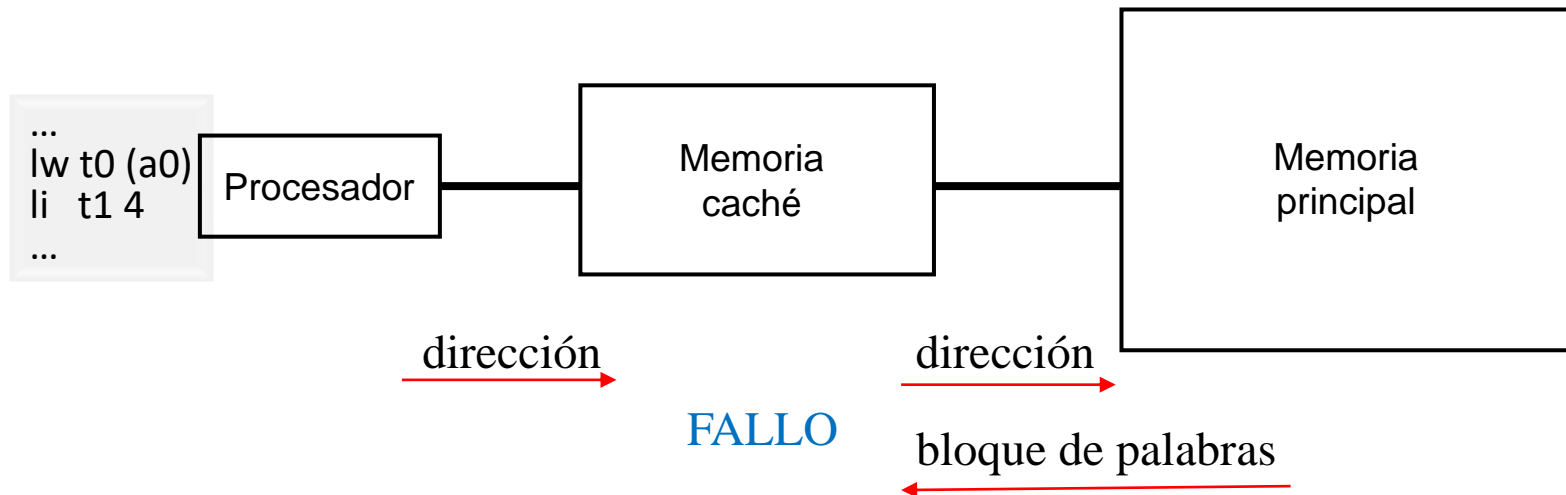
# Funcionamiento de la memoria cache

1. El procesador solicita contenidos de una posición de memoria.
2. La cache comprueba si ya están los datos de esta posición:
  - ▶ Si está (**ACIERTO**)
    - 3.A.1 Se la sirve al procesador desde la cache (rápidamente).
  - ▶ Si no está (**FALLO**)
    - 3.B.1 La cache transfiere de memoria principal el bloque asociado a la posición.
    - 3.B.2 Después, la cache entrega los datos pedidos al procesador.



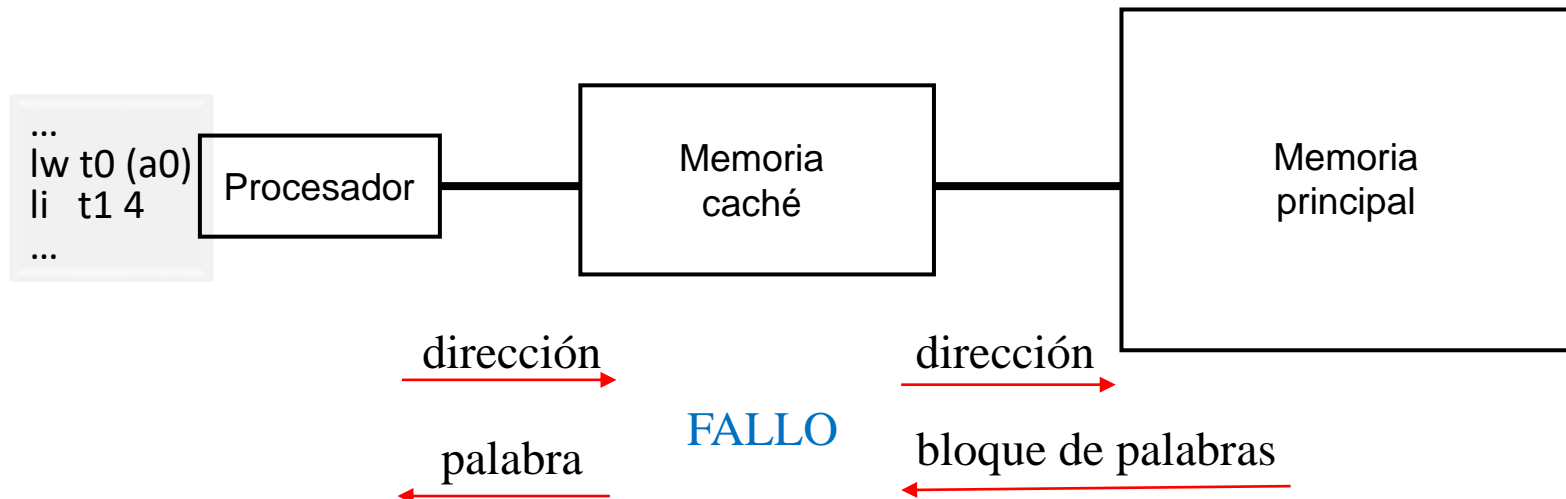
# Funcionamiento de la memoria cache

1. El procesador solicita contenidos de una posición de memoria.
2. La cache comprueba si ya están los datos de esta posición:
  - ▶ Si está (**ACIERTO**)
    - 3.A.1 Se la sirve al procesador desde la cache (rápidamente).
  - ▶ Si no está (**FALLO**)
    - 3.B.1 La cache transfiere de memoria principal el bloque asociado a la posición.
    - 3.B.2 Después, la cache entrega los datos pedidos al procesador.



# Funcionamiento de la memoria cache

1. El procesador solicita contenidos de una posición de memoria.
2. La cache comprueba si ya están los datos de esta posición:
  - ▶ Si está (**ACIERTO**)
    - 3.A.1 Se la sirve al procesador desde la cache (rápidamente).
  - ▶ Si no está (**FALLO**)
    - 3.B.1 La cache transfiere de memoria principal el bloque asociado a la posición.
    - 3.B.2 Después, la cache entrega los datos pedidos al procesador.

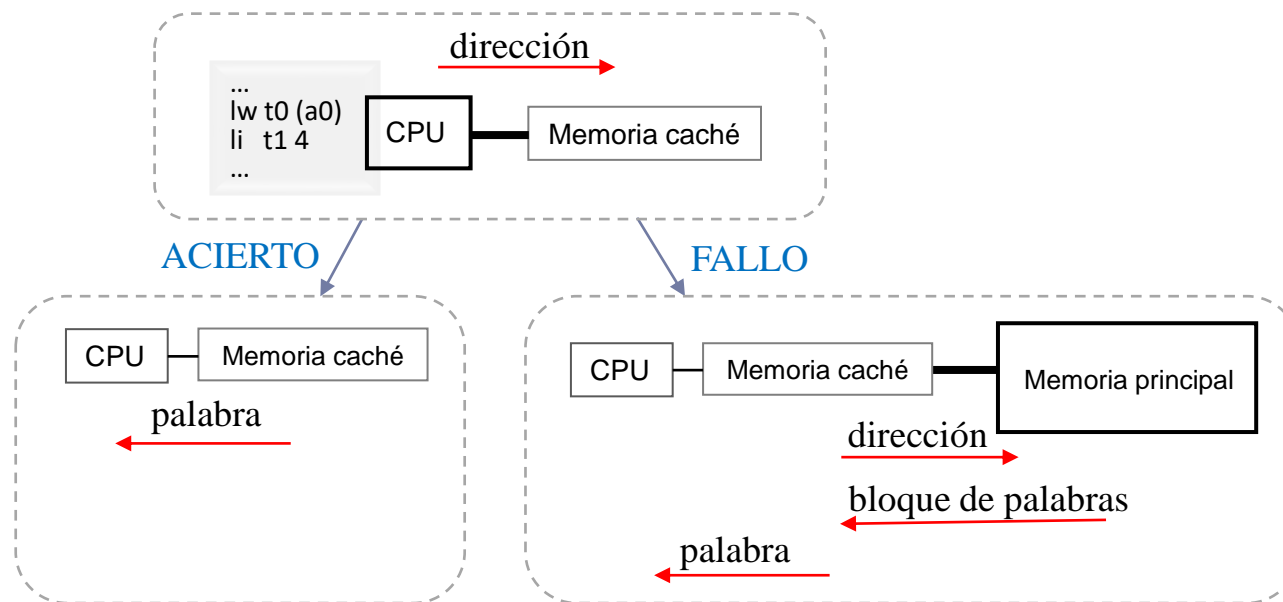




# Funcionamiento de la memoria caché

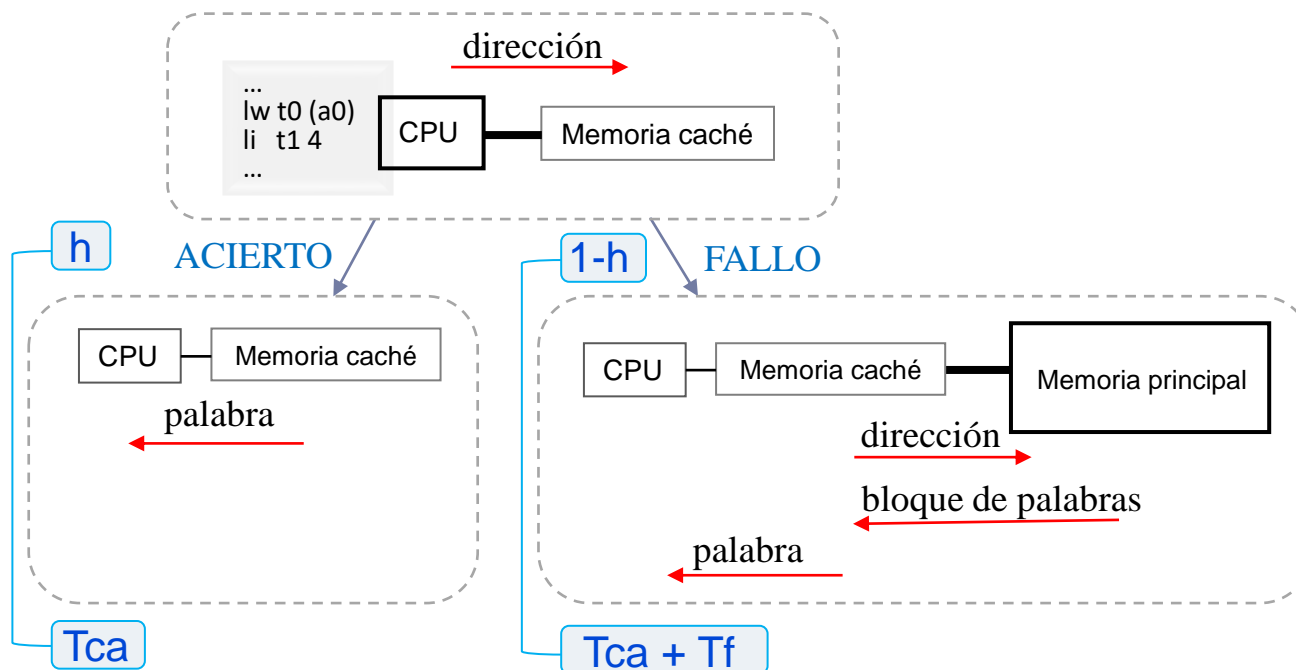
## Resumen

1. El procesador solicita contenidos de una posición de memoria.
2. La cache comprueba si ya están los datos de esta posición:
  - ▶ **Si está (ACIERTO)**
    - 3.A.1** Se la sirve al procesador desde la cache (rápidamente).
  - ▶ **Si no está (FALLO)**
    - 3.B.1** La cache transfiere de memoria principal el bloque asociado a la posición.
    - 3.B.2** Después, la cache entrega los datos pedidos al procesador.



# Funcionamiento de la memoria caché

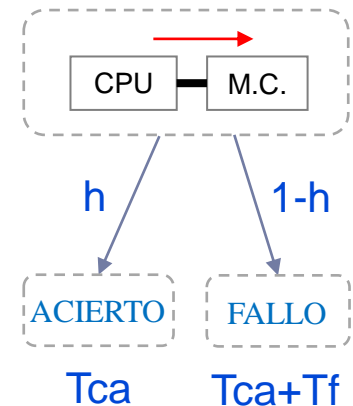
1. El procesador solicita contenidos de una posición de memoria.
2. La cache comprueba si ya están los datos de esta posición:
  - ▶ **Si está (ACIERTO)**
    - 3.A.1** Se la sirve al procesador desde la cache (rápidamente).
  - ▶ **Si no está (FALLO)**
    - 3.B.1** La cache transfiere de memoria principal el bloque asociado a la posición.
    - 3.B.2** Después, la cache entrega los datos pedidos al procesador.



# Tiempo medio de acceso a caché

- ▶ Tiempo medio de acceso a un sistema de memoria con dos niveles:

$$\begin{aligned} T_m &= h \cdot T_a + (1-h) \cdot (T_a + T_f) \\ &= T_a + (1-h) \cdot T_f \end{aligned}$$



- ▶ **Ta**: tiempo de acceso a la caché
- ▶ **Tf**: tiempo en tratar el fallo
  - ▶ Incluye el tiempo en reemplazar un bloque, traer un bloque de memoria principal a caché, etc.
- ▶ **h**: tasa de aciertos

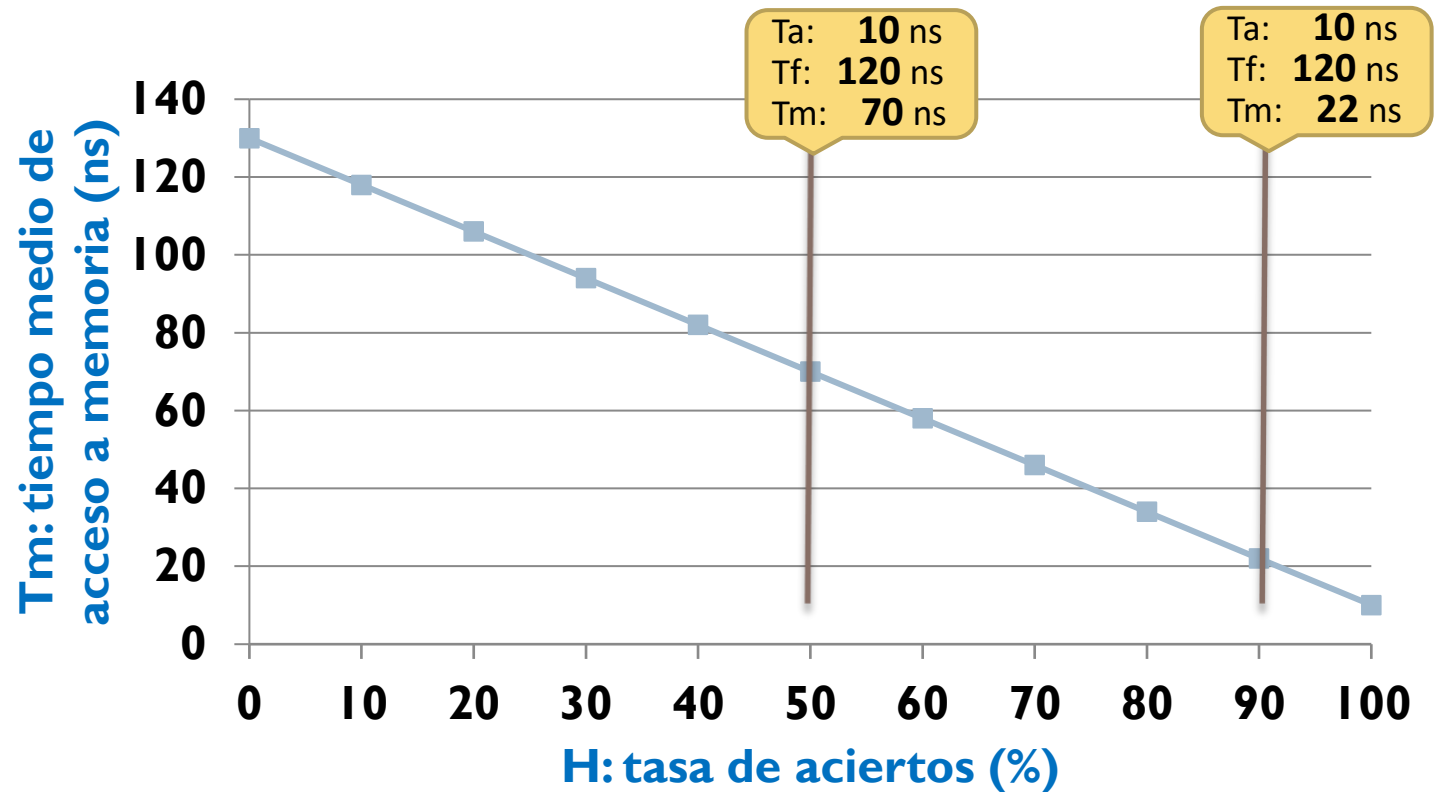
# Ejemplo

$$\begin{aligned}T_m &= h \cdot T_a + (1-h) \cdot (T_a + T_f) \\ &= T_a + (1-h) \cdot T_f\end{aligned}$$

1.  $T_a$ : Tiempo de acceso a caché = **10** ns
2.  $T_f$ : Tiempo de acceso a memoria principal = **120** ns
3.  $h$ : tasa de aciertos  $\rightarrow X = 0.1, 0.2, \dots, 0.9, 1.0$   
**10%, 20%, ..., 90%, 100%**

# Ejemplo

$$T_m = h \cdot T_a + (1-h) \cdot (T_a + T_f)$$
$$= T_a + (1-h) \cdot T_f$$



# Ejercicio

- ▶ **Computador:**
  - ▶ Tiempo de acceso a caché: 4 ns
  - ▶ Tiempo de acceso a bloque de MP: 120 ns.
- ▶ Si se tiene una tasa de aciertos del 90%. ¿Cuál es el tiempo medio de acceso?
- ▶ Tasas de acierto necesarias para que el tiempo medio de acceso sea menor de 5 ns.

# Ejercicio (solución)

- ▶ **Computador:**

- ▶ Tiempo de acceso a caché: 4 ns
- ▶ Tiempo de acceso a bloque de MP: 120 ns.

- ▶ Si se tiene una tasa de aciertos del 90%. ¿Cuál es el tiempo medio de acceso?

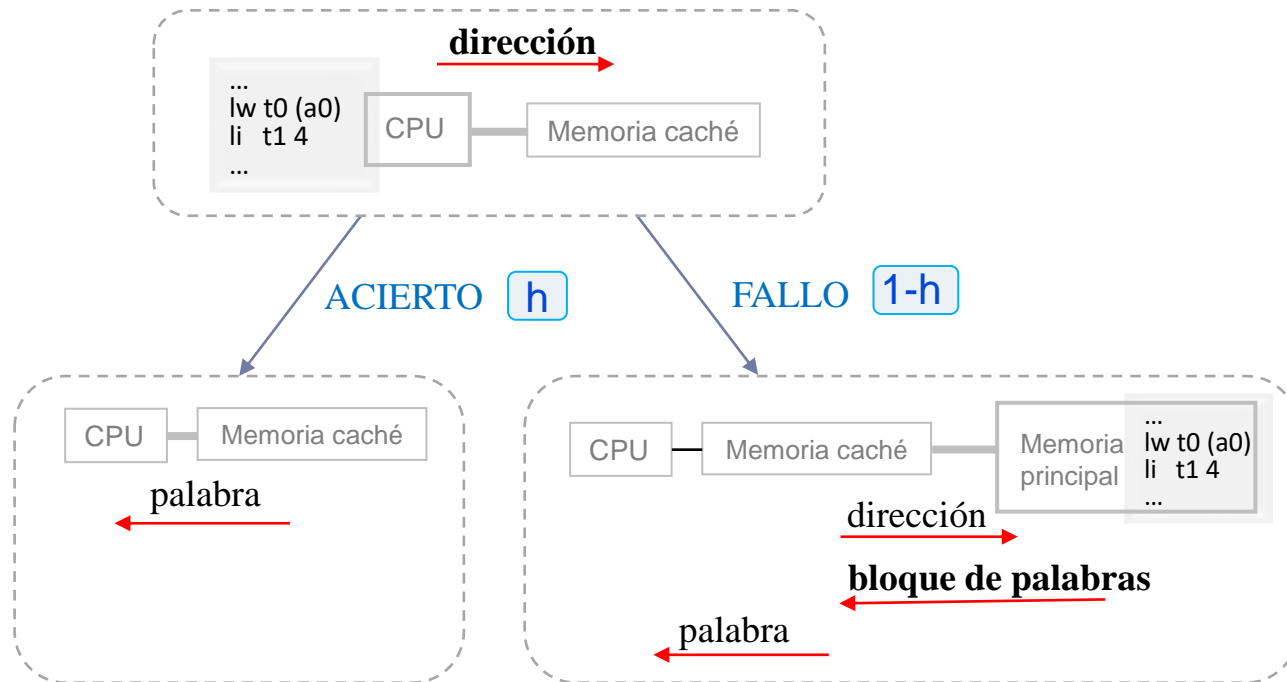
$$T_m = 4 \times 0.9 + (120 + 4) \times 0.1 = 16 \text{ ns}$$

- ▶ Tasas de acierto necesarias para que el tiempo medio de acceso sea menor de 5 ns.

$$\begin{aligned} 5 &= 4 \times h + (120 + 4) \times (1 - h) \\ \Rightarrow h &> 0.9916 \end{aligned}$$

# Tasa de aciertos de un fragmento de código

- ▶ La tasa de aciertos  $h$  depende de:
  - ▶ Disposición en memoria ppal. y caché (bloques afectados).
  - ▶ Traza de accesos (lista de direcciones) que genera al ejecutarse.
  - ▶ El comportamiento de la memoria caché (tiempo de búsqueda, remplazo, etc.)





# Ejemplo de funcionamiento

```
int i;  
int s = 0;  
for (i=0; i < 1000; i++)  
    s = s + i;
```

```
li    t0, 0      # s  
li    t1, 0      # i  
li    t2, 1000  
bucle: bge    t1, t2, fin  
add    t0, t0, t1  
addi   t1, t1, 1  
j      bucle  
fin:   ...
```

- ▶ Ejemplo:
  - ▶ Acceso a M.caché: 2 ns
  - ▶ Acceso a M.P.: 120 ns
  - ▶ Bloque de caché: 4 palabras
  - ▶ Transferencia de un bloque entre memoria principal y caché: 200 ns

# Ejemplo de funcionamiento

```
int i;  
int s = 0;  
for (i=0; i < 1000; i++)  
    s = s + i;
```

```
li    t0, 0      # s  
li    t1, 0      # i  
li    t2, 1000  
bucle: bge    t1, t2, fin  
add    t0, t0, t1  
addi   t1, t1, 1  
j      bucle  
fin:   ...
```

## ► Sin memoria caché:

- Número de accesos a memoria =  $3 + 4 \times 1000 + 1 = 4004$  accesos
- Tiempo de acceso a memoria =  $4004 \times 120 = 480480$  ns = 0,480 ms

# Ejemplo de funcionamiento

```
int i;  
int s = 0;  
for (i=0; i < 1000; i++)  
    s = s + i;
```

```
li    t0, 0      # s  
li    t1, 0      # i  
li    t2, 1000  
bucle: bge    t1, t2, fin  
add    t0, t0, t1  
addi   t1, t1, 1  
j      bucle  
fin:   ...
```

- ▶ **Con** memoria caché (bloque de 4 palabras):
  - ▶ Número de accesos = 4004 accesos
  - ▶ Número de bloques = ?
  - ▶ Número de fallos = ?
  - ▶ Tiempo de acceso = ?

# Ejemplo de funcionamiento

```
int i;  
int s = 0;  
for (i=0; i < 1000; i++)  
    s = s + i;
```

bucle:

```
li    t0, 0      # s  
li    t1, 0      # i  
li    t2, 1000  
bge   t1, t2, fin
```

fin:

```
add   t0, t0, t1  
addi  t1, t1, 1  
j     bucle  
...
```

## ► Con memoria caché (bloque de 4 palabras):

- Número de accesos = 4004 accesos
- Número de bloques = 2
- Número de fallos = ?
- Tiempo de acceso = ?

(1/2) estudio de bloques:  
análisis de bloques de datos y  
código afectados

# Ejemplo de funcionamiento

```
int i;  
int s = 0;  
for (i=0; i < 1000; i++)  
    s = s + i;
```

bucle:

```
li    t0, 0    # s  
li    t1, 0    # i  
li    t2, 1000  
bge   t1, t2, fin
```

fin:

```
add   t0, t0, t1  
addi  t1, t1, 1  
j     bucle  
...
```

## ► Con memoria caché (bloque de 4 palabras):

- Número de accesos = 4004 accesos
- Número de bloques = 2
- Número de fallos = ?
- Tiempo de acceso = ?

(2/2) estudio de referencias  
generadas por ejecución: accesos  
a código (fetch) y datos

# Ejemplo de funcionamiento

(2/2) estudio de referencias generadas

procesador

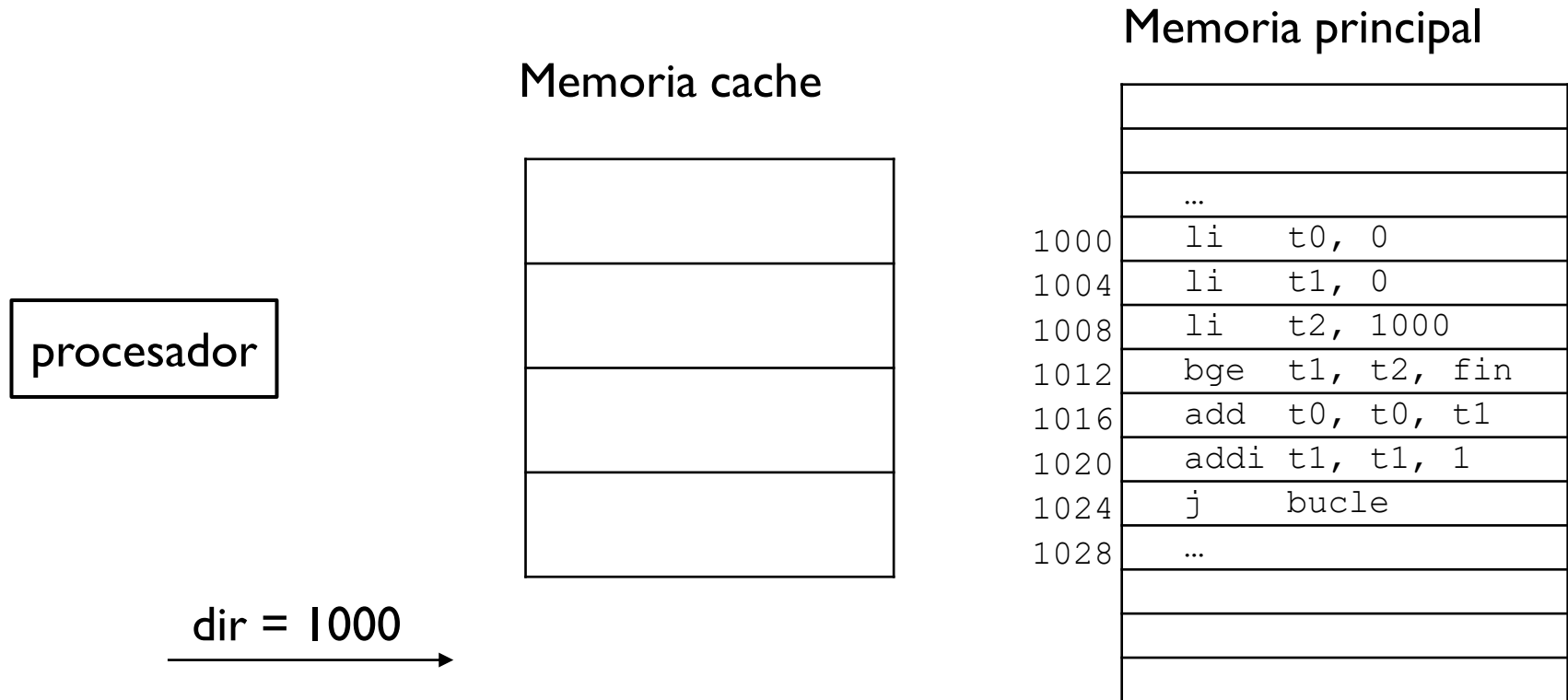
Memoria cache


Memoria principal

	...
1000	li t0, 0
1004	li t1, 0
1008	li t2, 1000
1012	bge t1, t2, fin
1016	add t0, t0, t1
1020	addi t1, t1, 1
1024	j bucle
1028	...

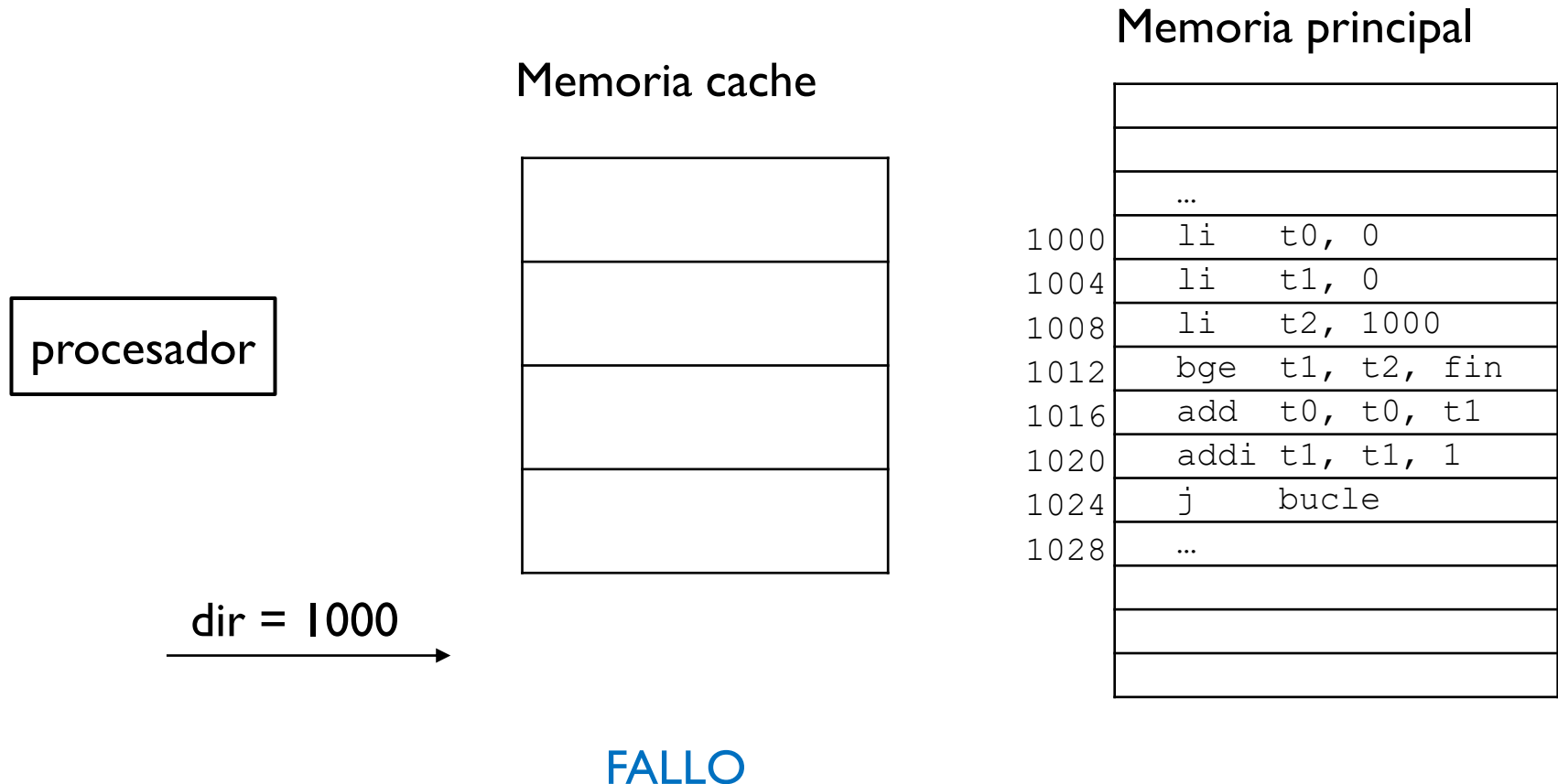
# Ejemplo de funcionamiento

(2/2) estudio de referencias generadas



# Ejemplo de funcionamiento

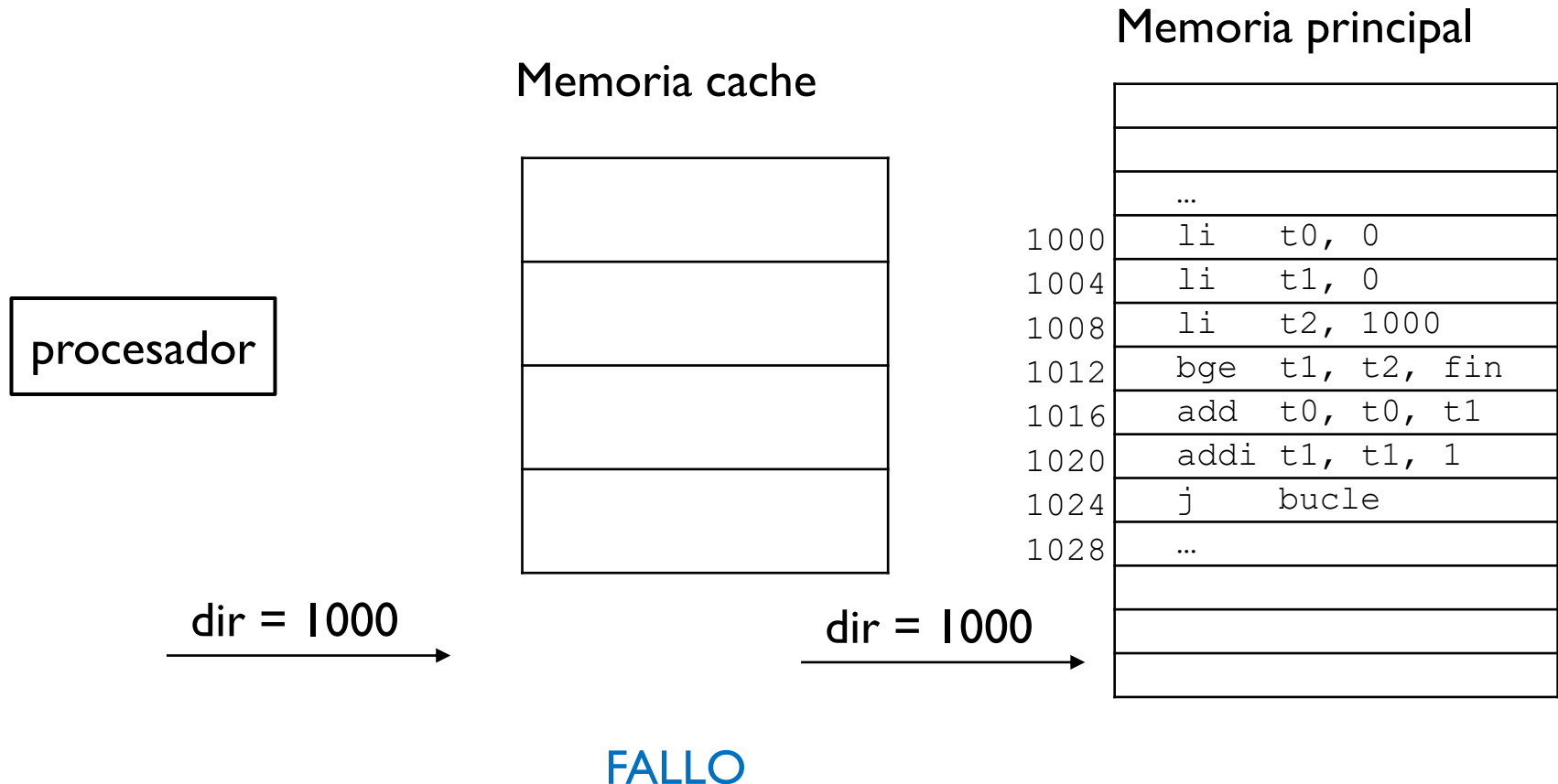
(2/2) estudio de referencias generadas





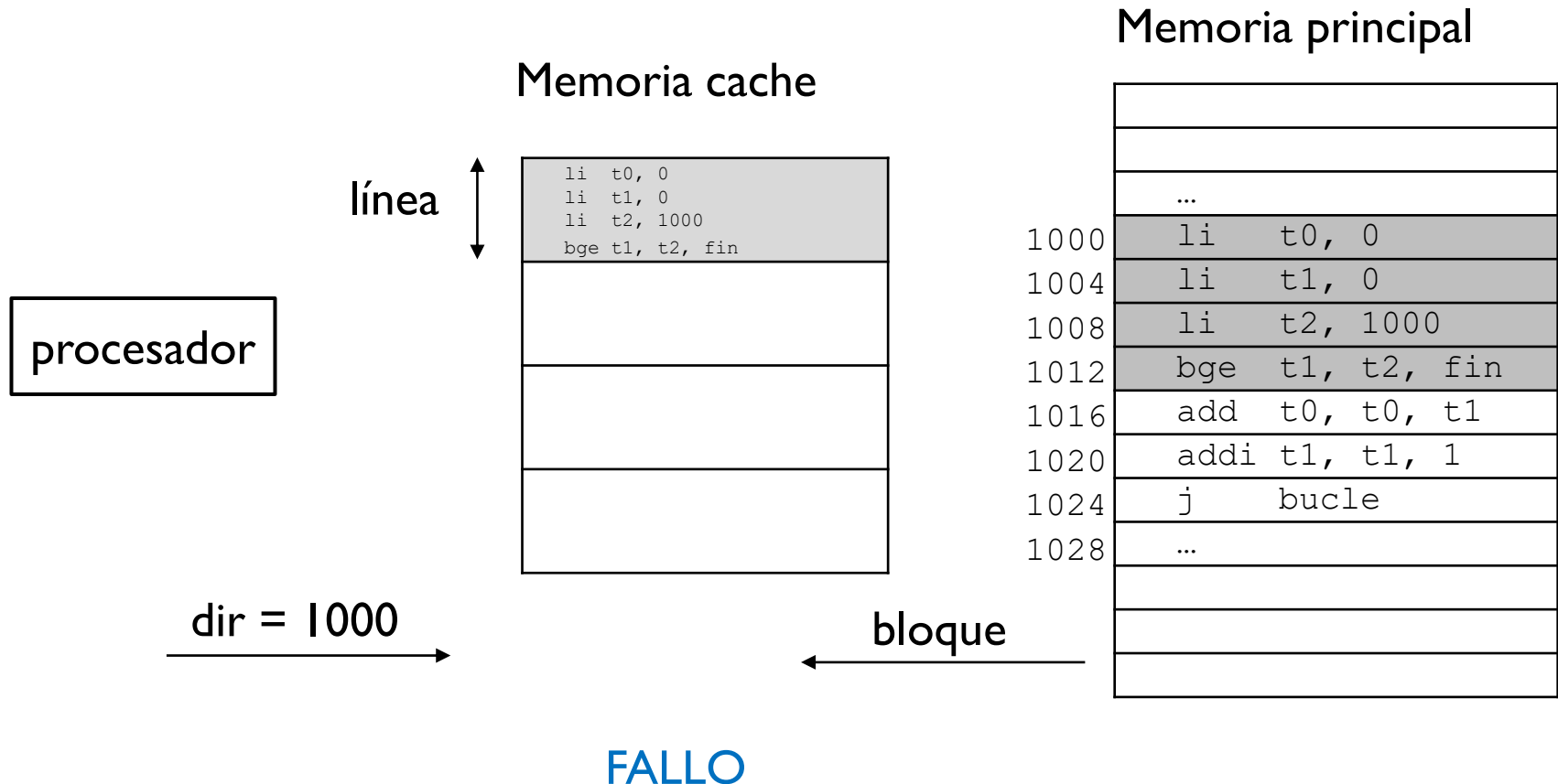
# Ejemplo de funcionamiento

(2/2) estudio de referencias generadas



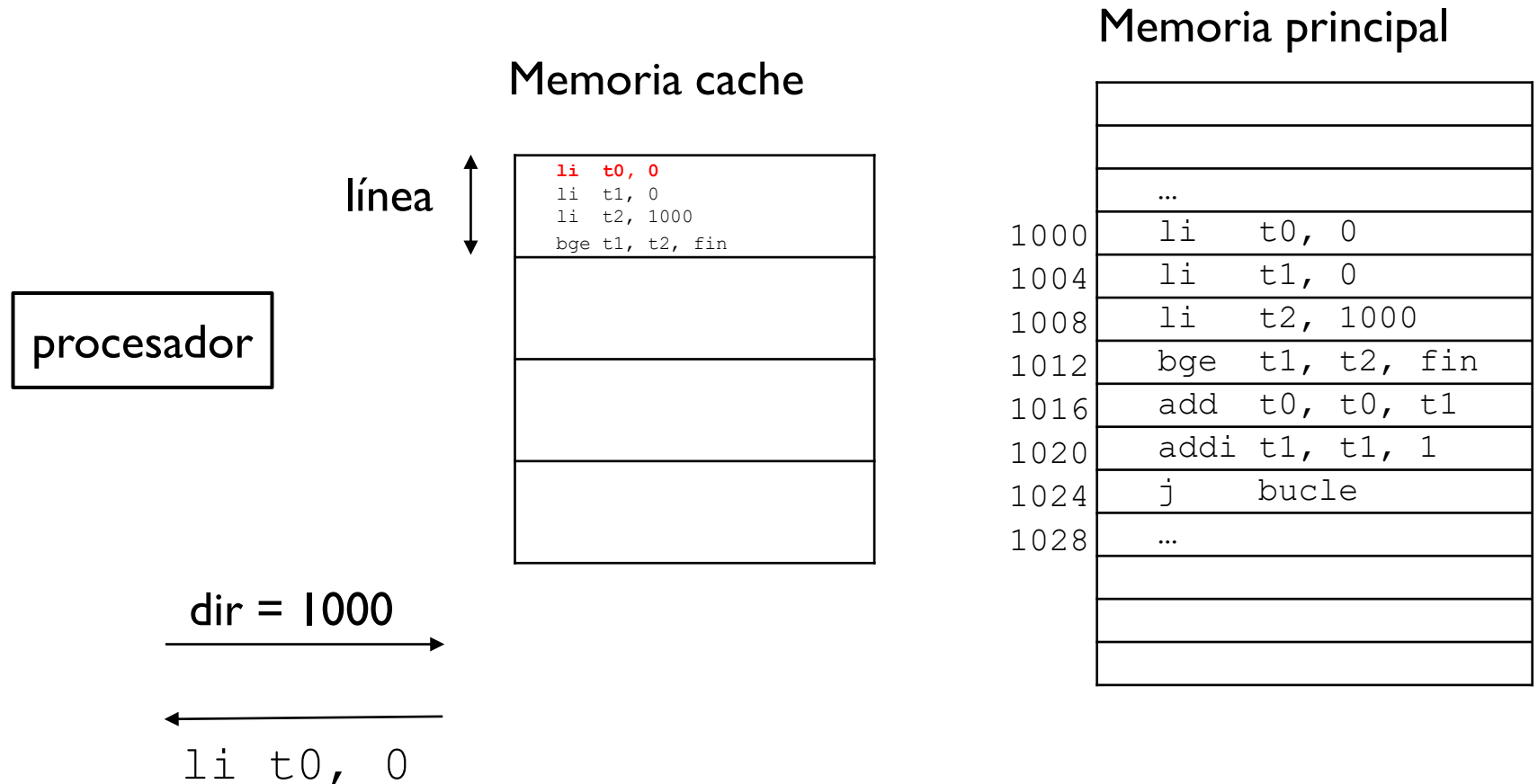
# Ejemplo de funcionamiento

(2/2) estudio de referencias generadas



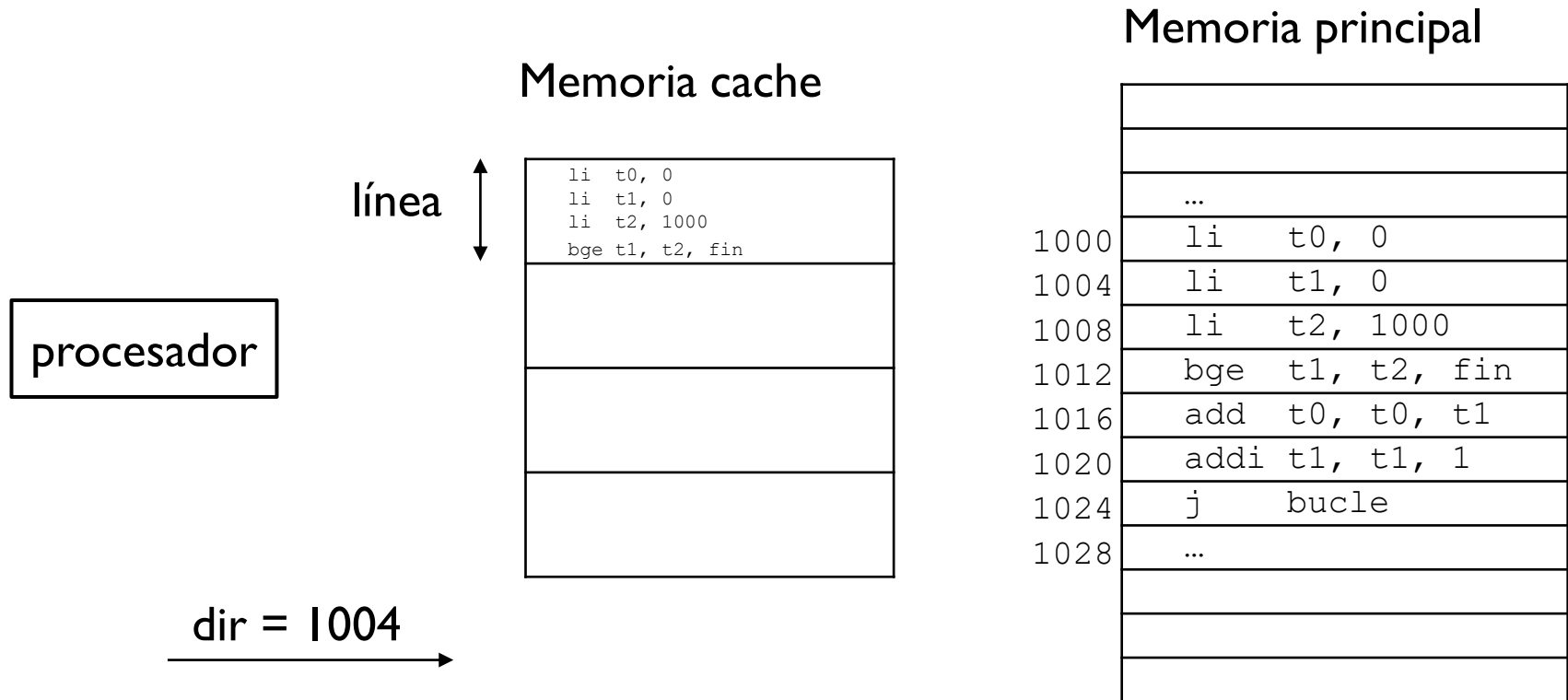
# Ejemplo de funcionamiento

(2/2) estudio de referencias generadas



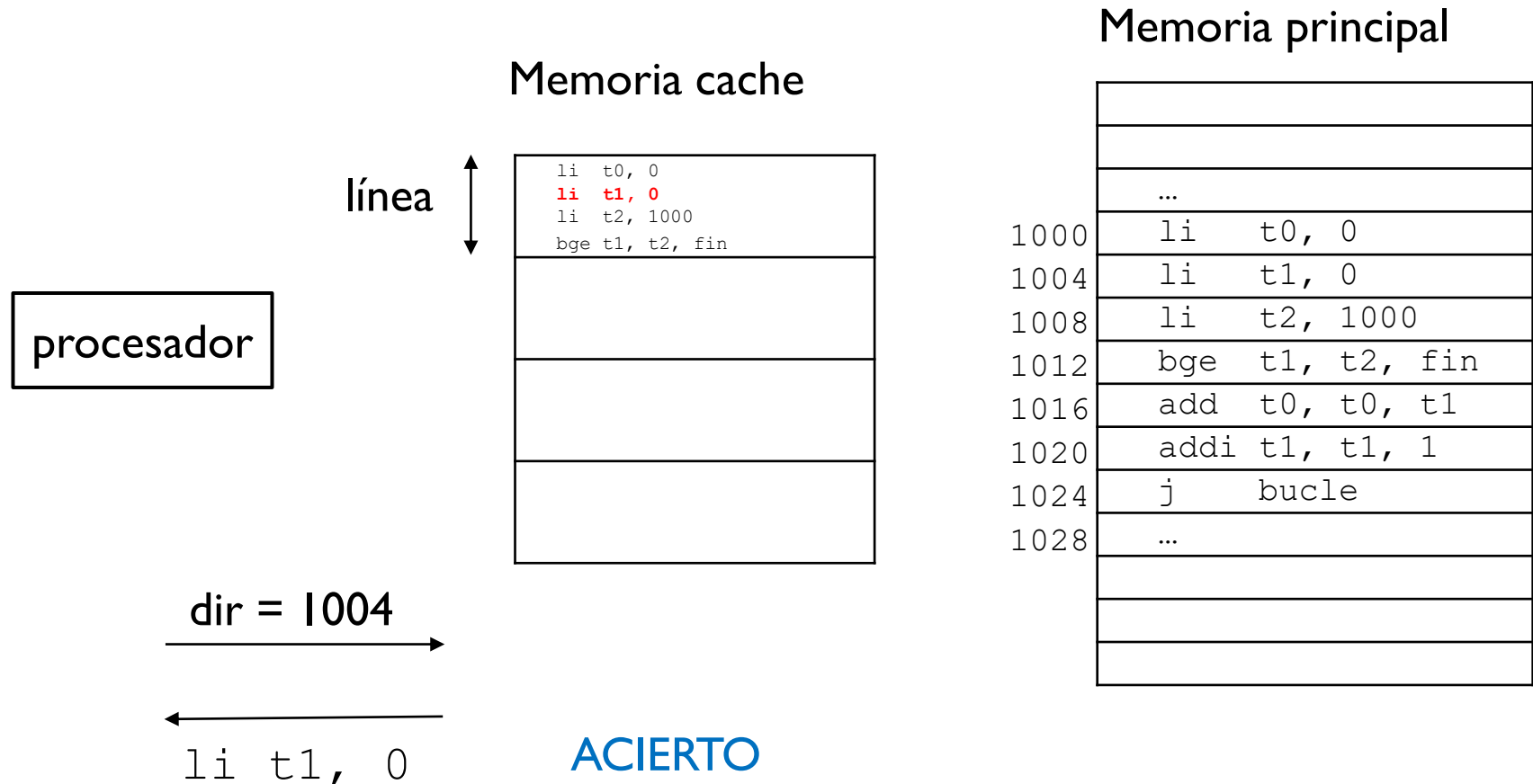
# Ejemplo de funcionamiento

(2/2) estudio de referencias generadas



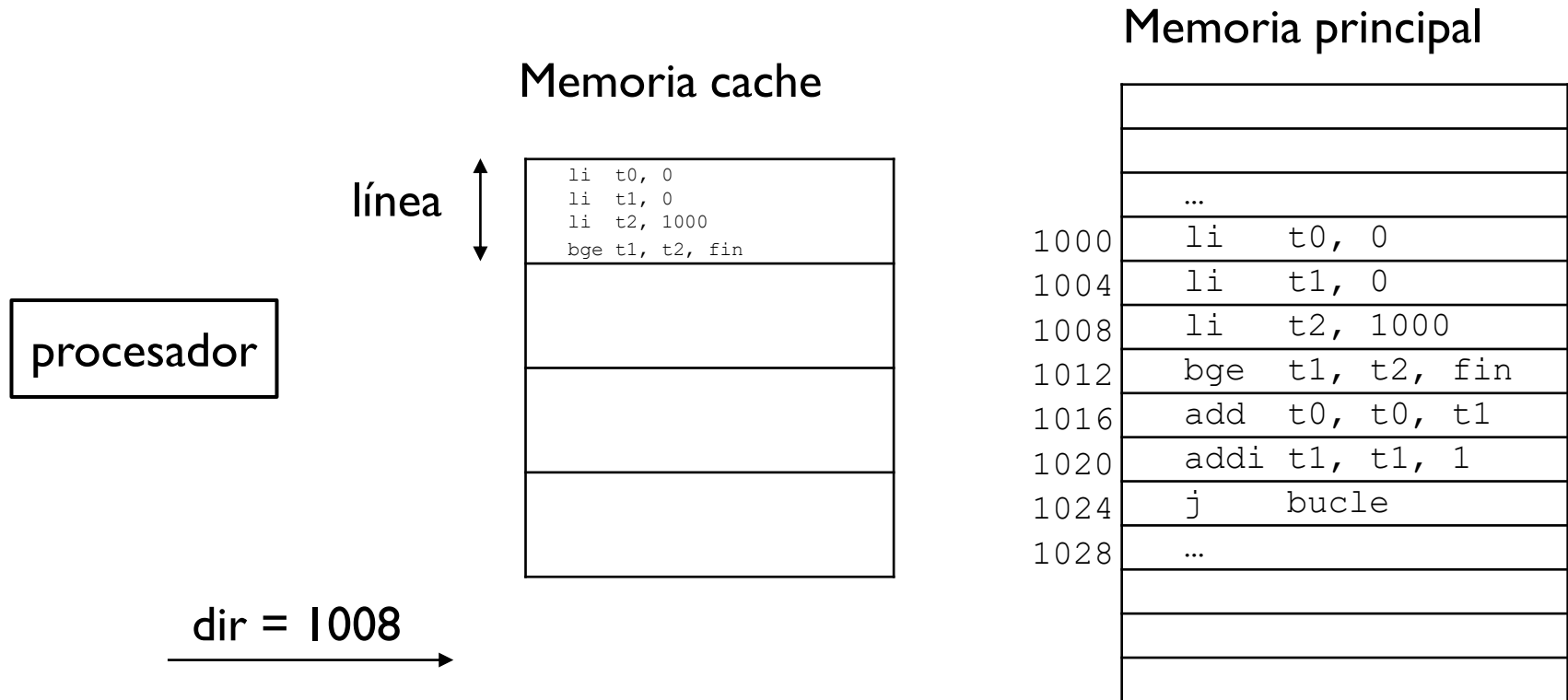
# Ejemplo de funcionamiento

(2/2) estudio de referencias generadas



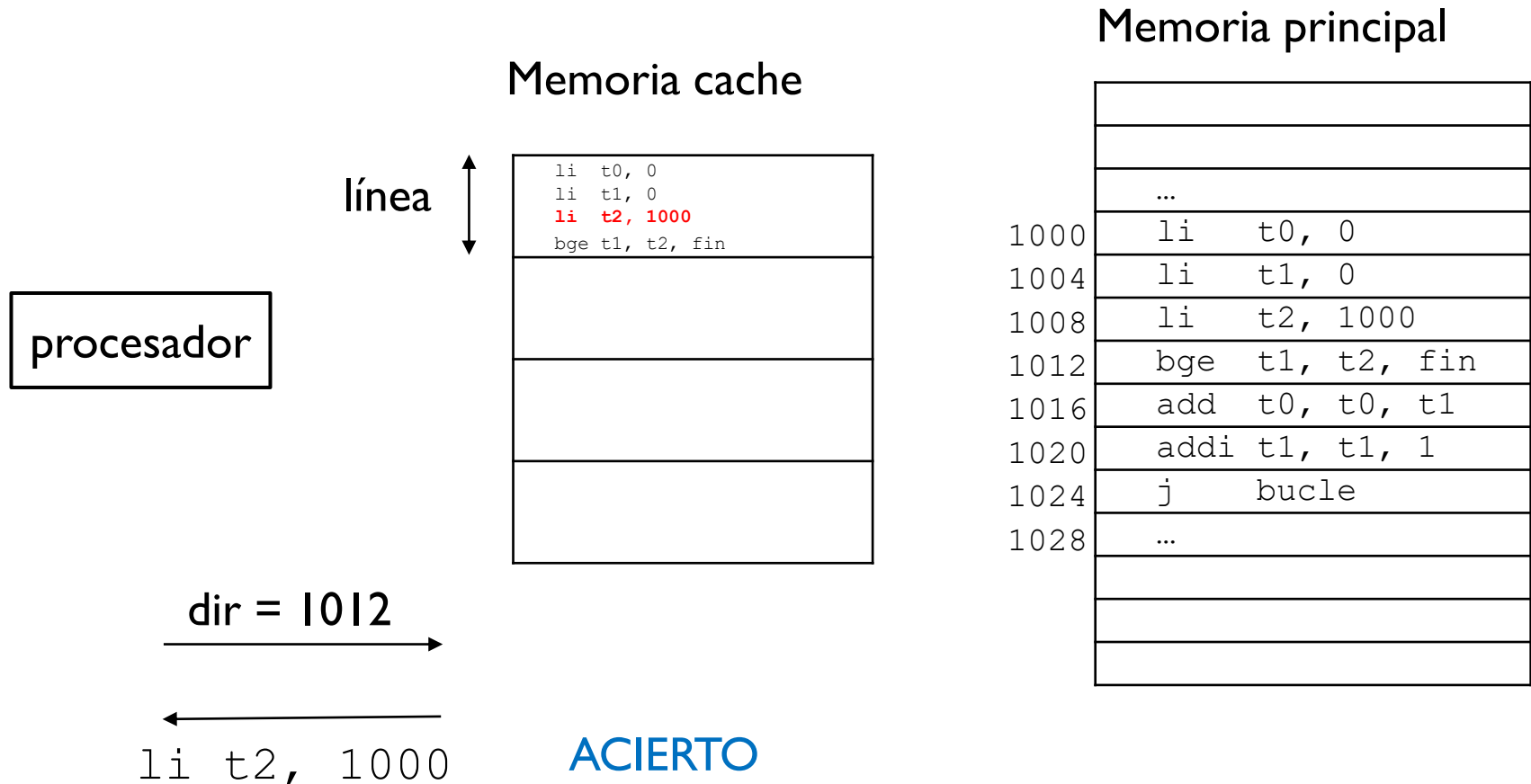
# Ejemplo de funcionamiento

(2/2) estudio de referencias generadas



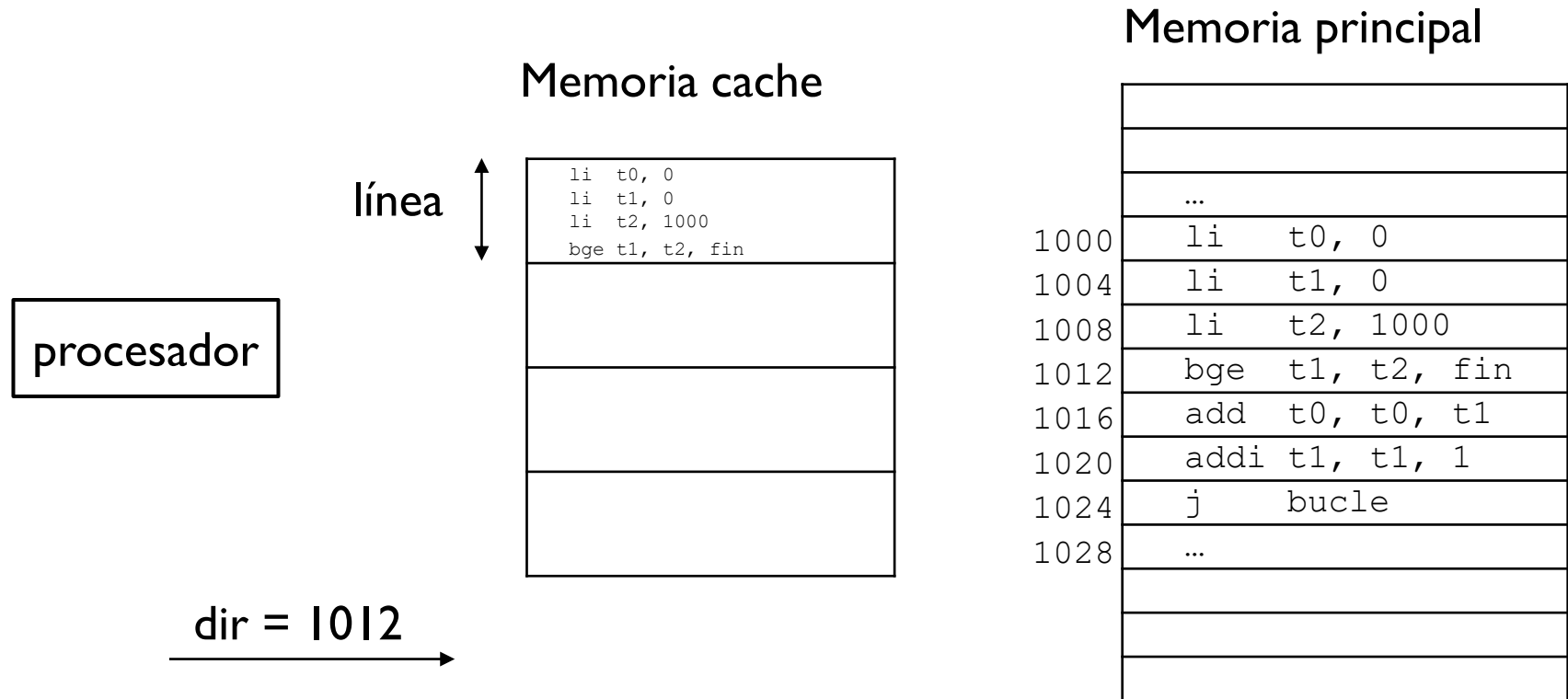
# Ejemplo de funcionamiento

(2/2) estudio de referencias generadas



# Ejemplo de funcionamiento

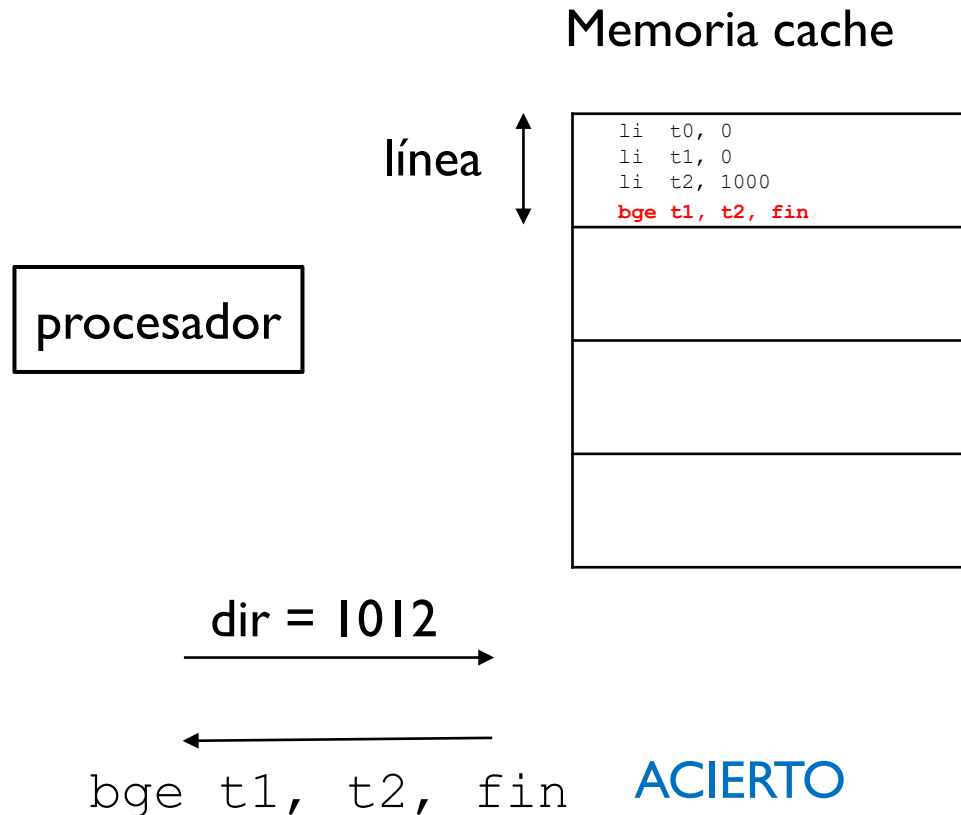
(2/2) estudio de referencias generadas





# Ejemplo de funcionamiento

(2/2) estudio de referencias generadas

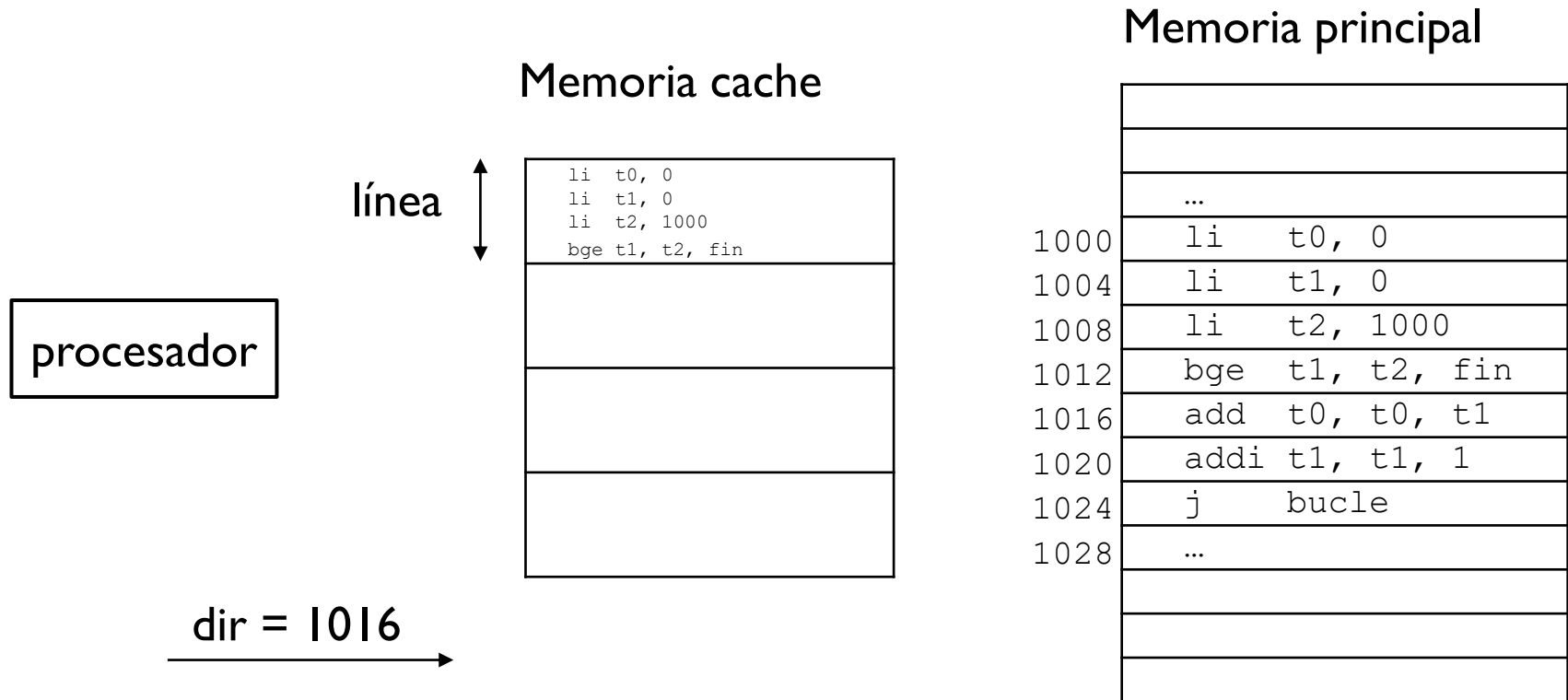


## Memoria principal

	...
1000	li t0, 0
1004	li t1, 0
1008	li t2, 1000
1012	bge t1, t2, fin
1016	add t0, t0, t1
1020	addi t1, t1, 1
1024	j bucle
1028	...

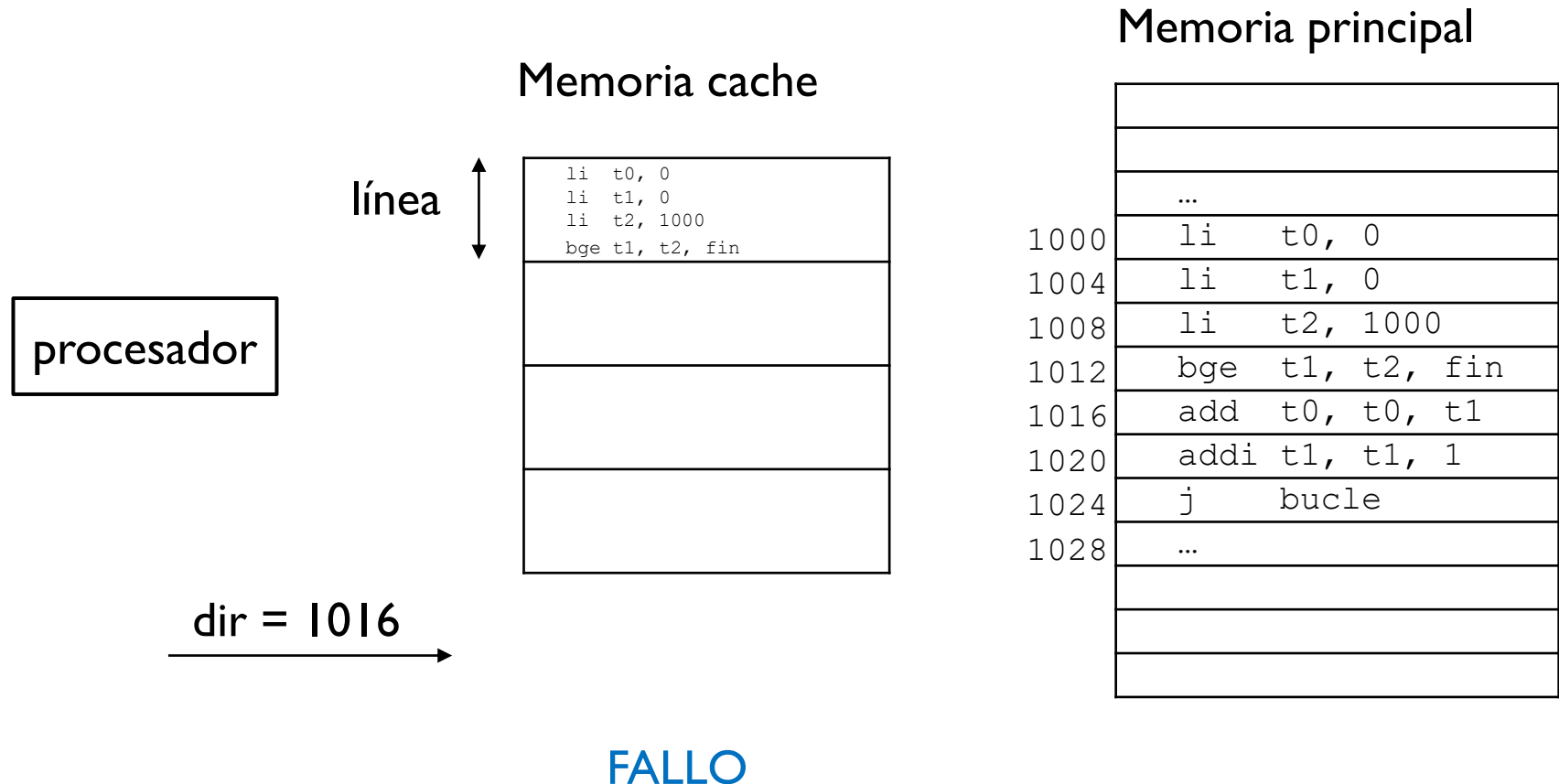
# Ejemplo de funcionamiento

(2/2) estudio de referencias generadas



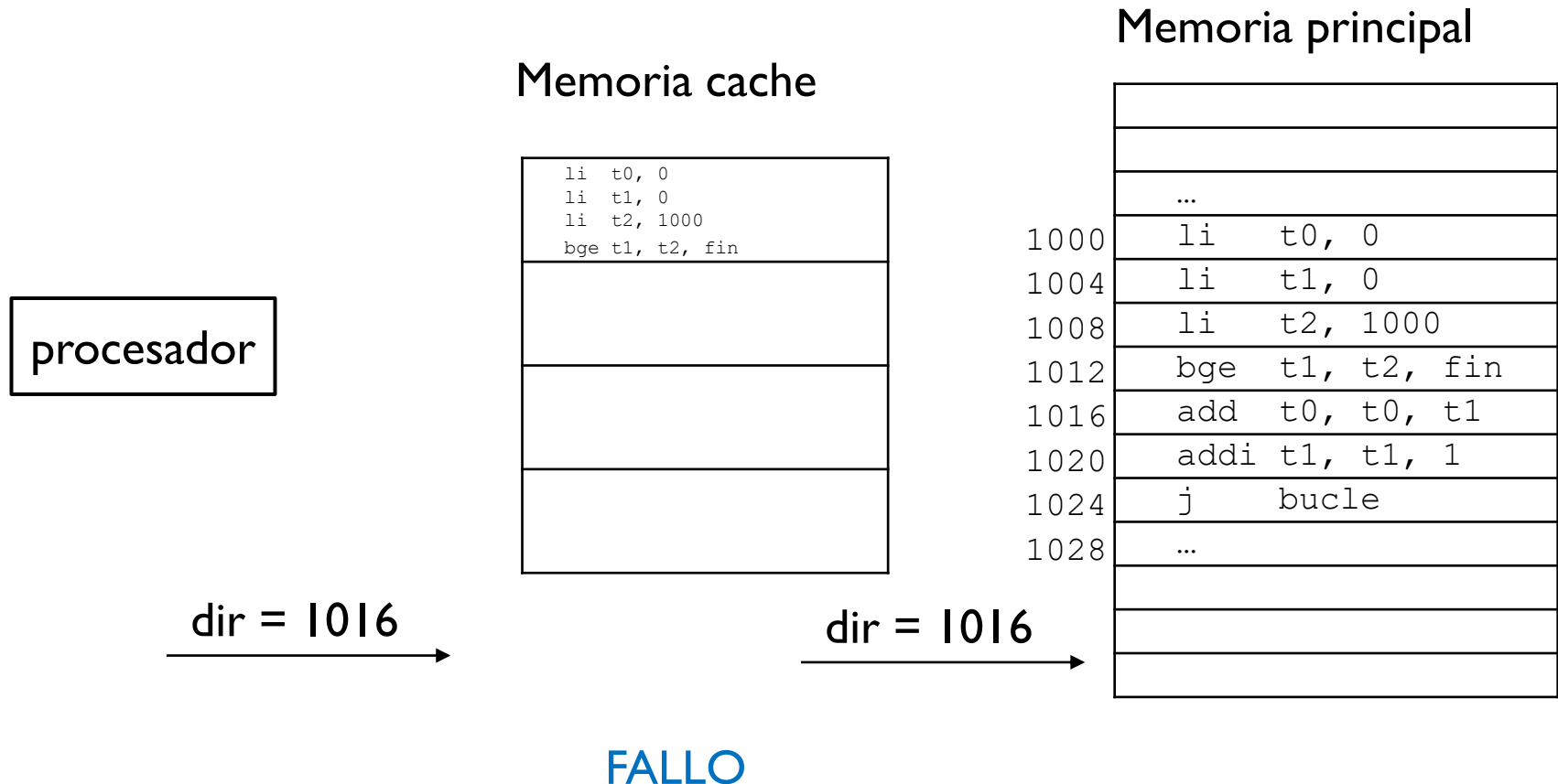
# Ejemplo de funcionamiento

(2/2) estudio de referencias generadas



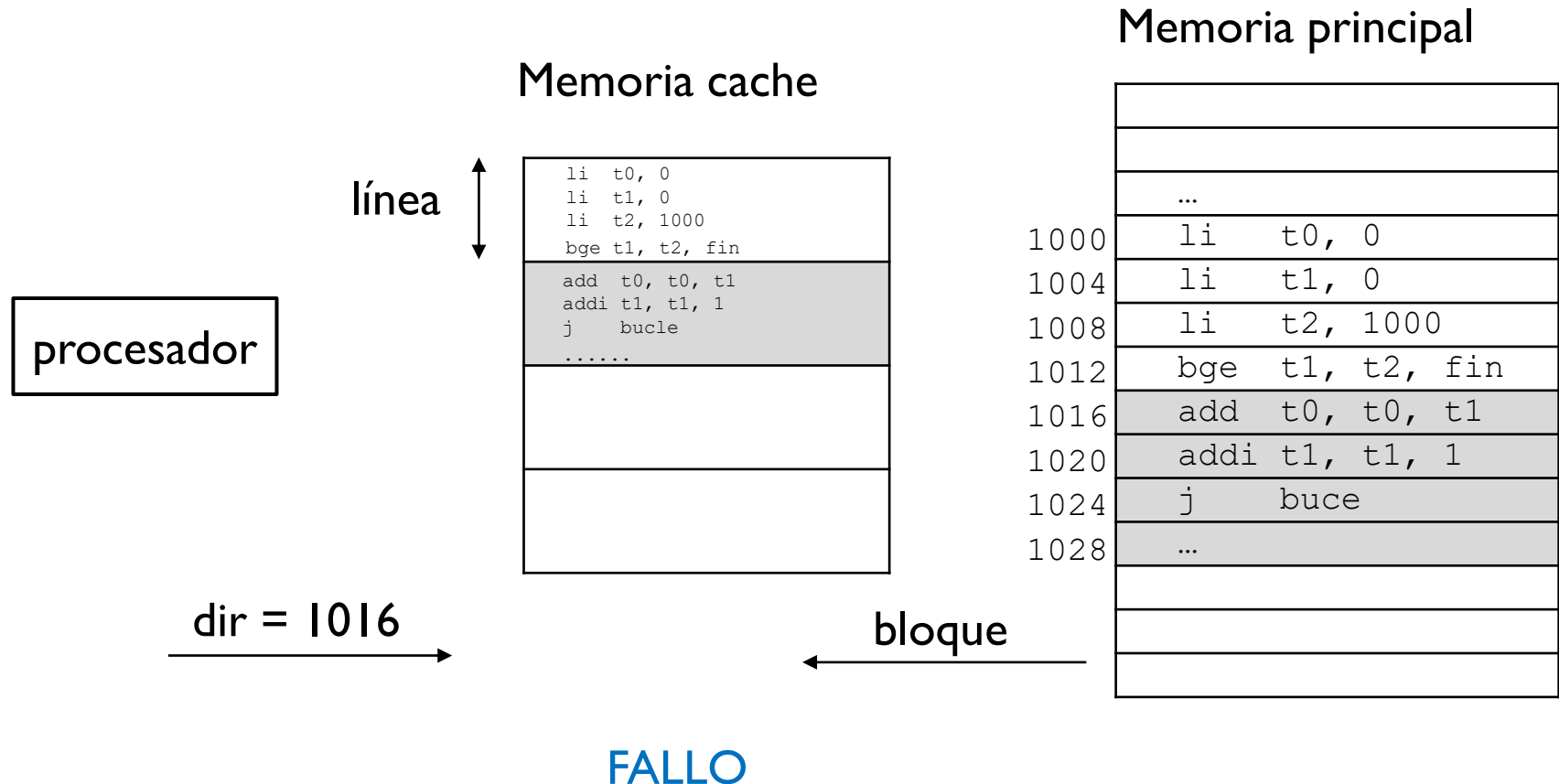
# Ejemplo de funcionamiento

(2/2) estudio de referencias generadas



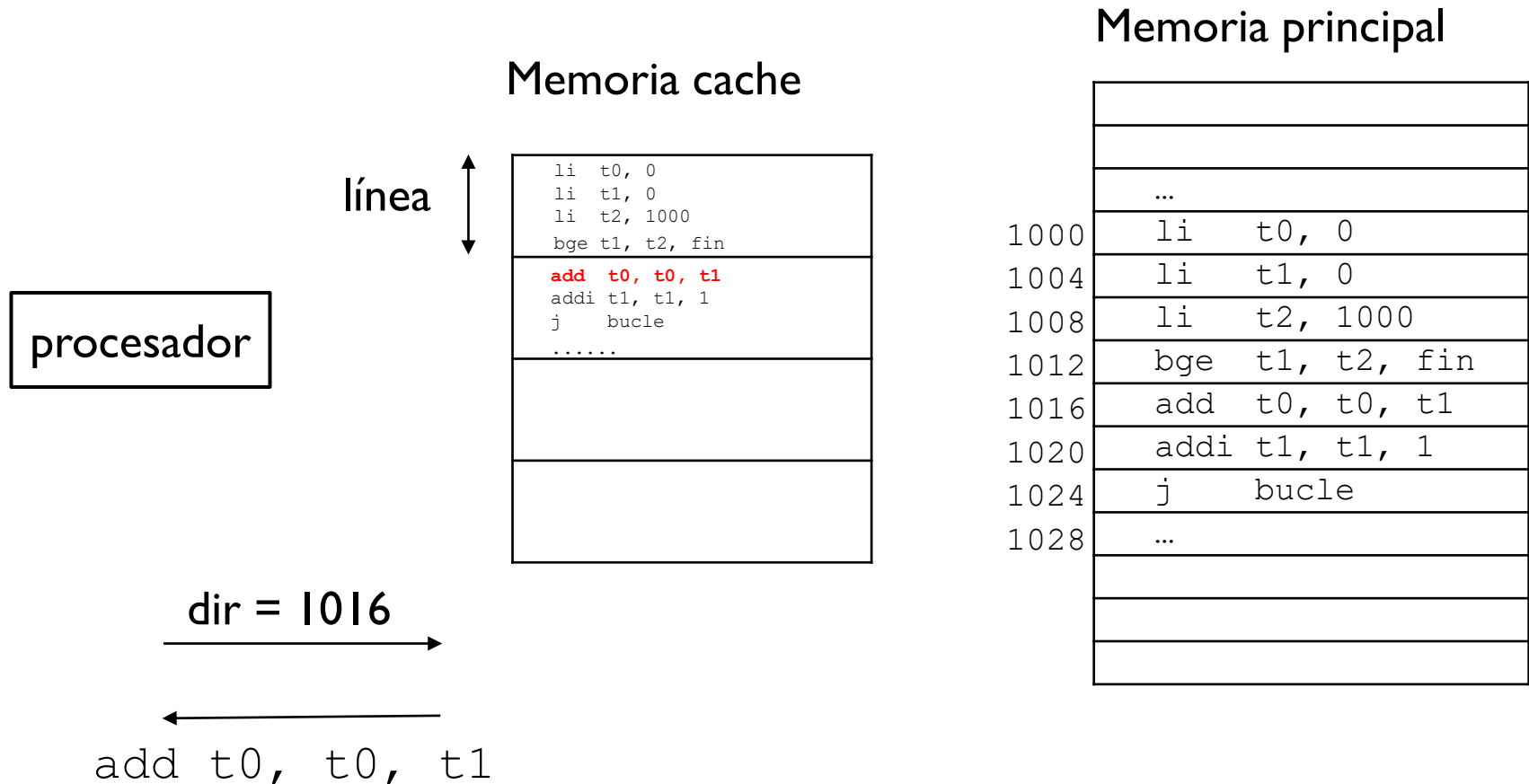
# Ejemplo de funcionamiento

(2/2) estudio de referencias generadas



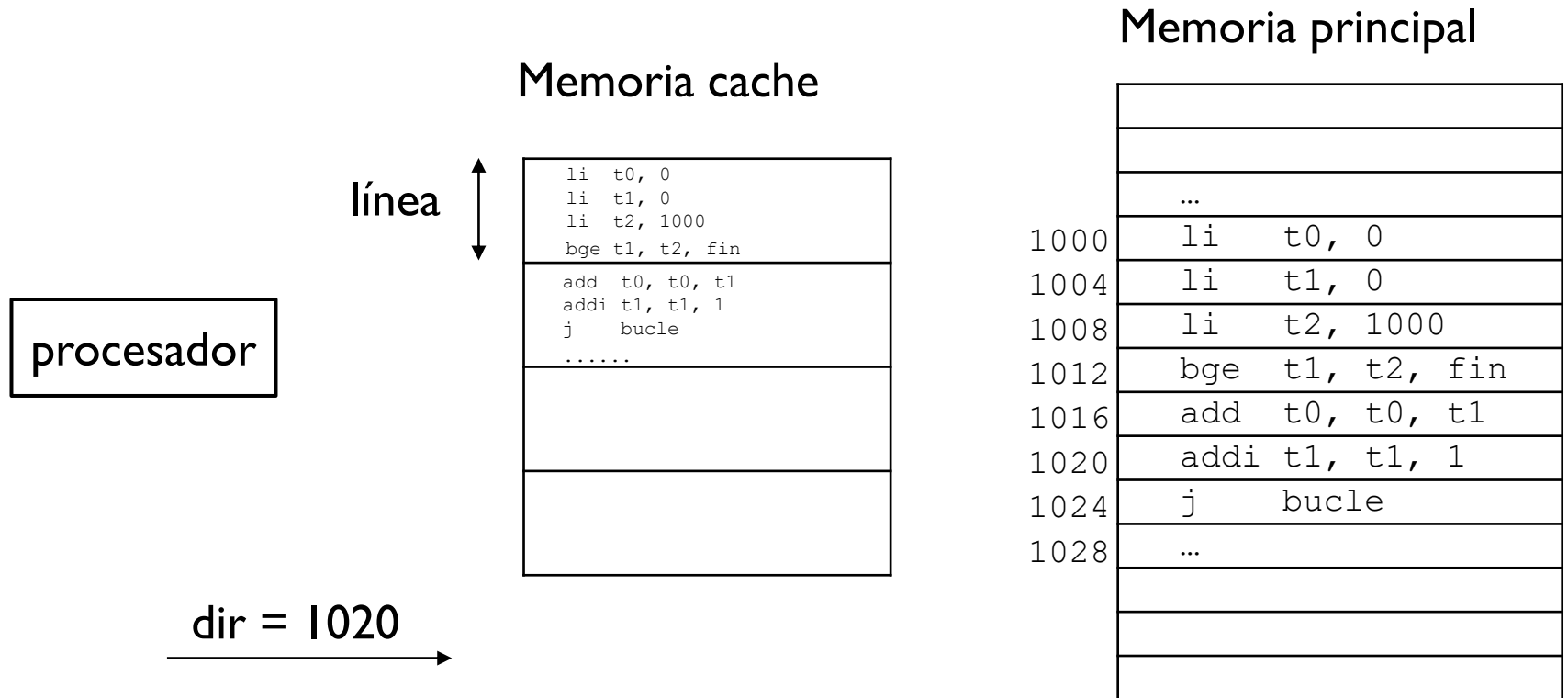
# Ejemplo de funcionamiento

(2/2) estudio de referencias generadas



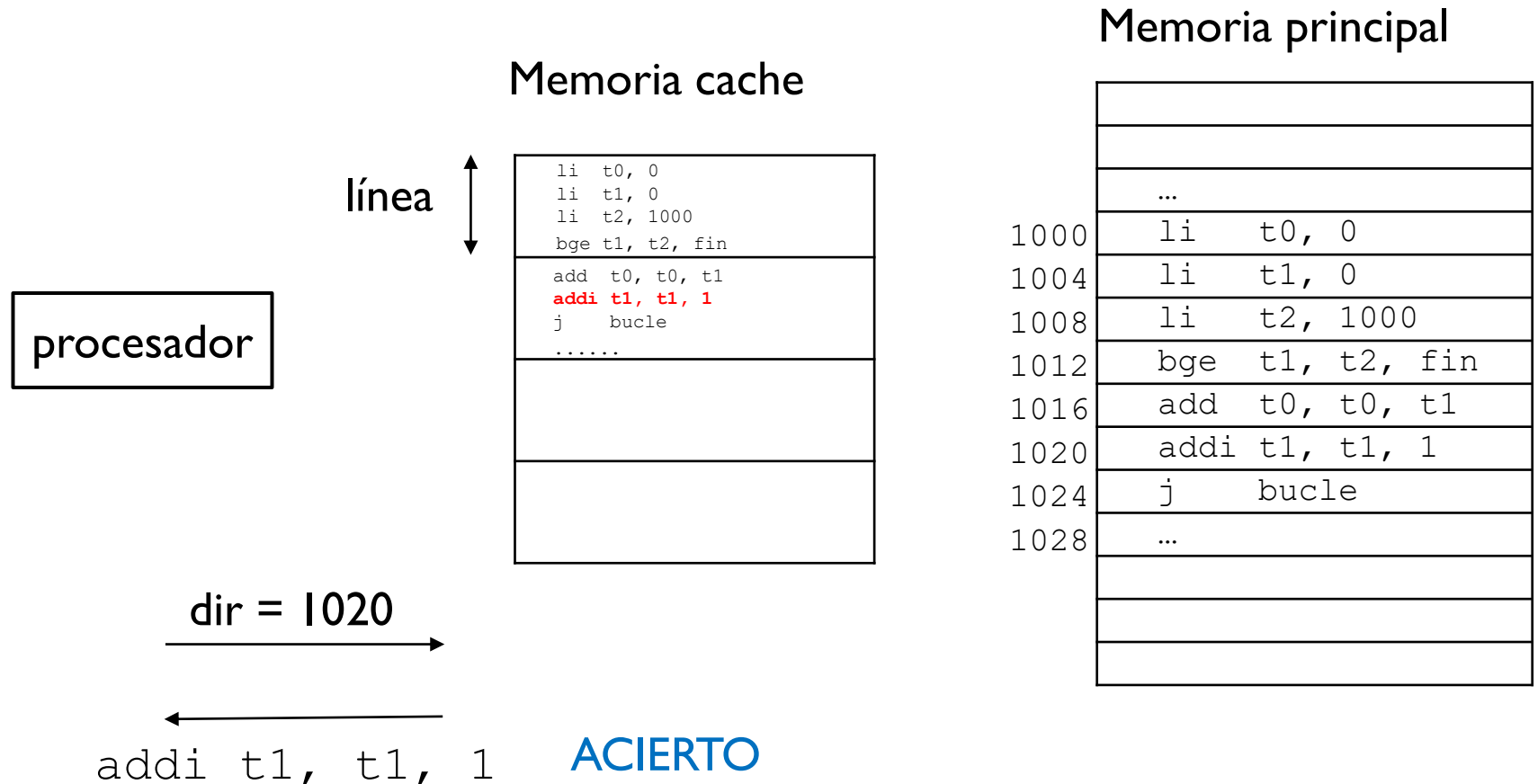
# Ejemplo de funcionamiento

(2/2) estudio de referencias generadas



# Ejemplo de funcionamiento

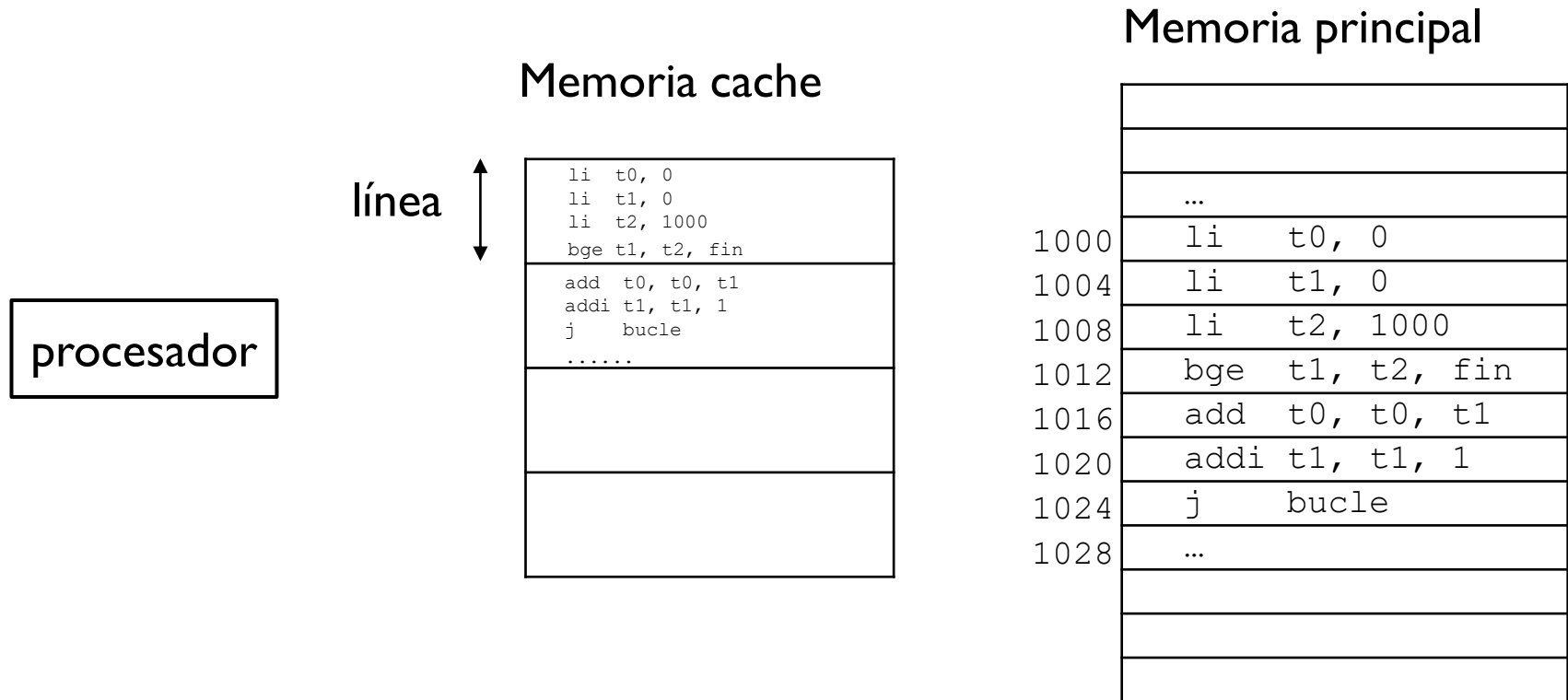
(2/2) estudio de referencias generadas





# Ejemplo de funcionamiento

(2/2) estudio de referencias generadas



El resto de los accesos son ACIERTOS

# Ejemplo de funcionamiento

```
int i;  
int s = 0;  
for (i=0; i < 1000; i++)  
    s = s + i;
```

bucle:

```
li    t0, 0      # s  
li    t1, 0      # i  
li    t2, 1000  
bge   t1, t2, fin
```

fin:

```
add   t0, t0, t1  
addi  t1, t1, 1  
j     bucle  
...
```

## ► **Con** memoria caché (bloque de 4 palabras):

- Número de accesos = 4004 accesos
- Número de bloques = 2
- Número de fallos = 2
- Tiempo de acceso = ?

(2/2) estudio de referencias  
generadas por ejecución: accesos  
a código (fetch) y datos

# Ejemplo de funcionamiento

```
int i;  
int s = 0;  
for (i=0; i < 1000; i++)  
    s = s + i;
```

bucle:

```
li    t0, 0      # s  
li    t1, 0      # i  
li    t2, 1000  
bge   t1, t2, fin
```

fin:

```
add   t0, t0, t1  
addi  t1, t1, 1  
j     bucle  
...
```

## ► Con memoria caché (bloque de 4 palabras):

- Número de accesos = 4004 accesos
- Número de bloques = 2
- Número de fallos = 2
- **Tiempo de acceso = 8408 ns**

- Tiempo para transferir 2 bloques =  $200 \times 2 = 400$  ns

- Tiempo de acceso a la caché =  $4004 \times 2 = 8008$  ns

- Acceso a M.caché: 2 ns
- Acceso a M.P.: 120 ns
- Bloque de caché: 4 palabras
- Transferencia de un bloque entre memoria principal y caché: 200 ns

# Ejemplo de funcionamiento

<pre>int i; int s = 0; for (i=0; i &lt; 1000; i++)     s = s + i;</pre>	<pre>bucle:  li    t0, 0      # s         li    t1, 0      # i         li    t2, 1000         bge   t1, t2, fin         add   t0, t0, t1         addi  t1, t1, 1         j     bucle fin:    ...</pre>
-------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

- ▶ Sin memoria caché = 480480 ns
- ▶ Con memoria caché = 8408 ns
- ▶ Tasa de aciertos a la caché =  $4002 / 4004 \Rightarrow 99,95 \%$

¡ x57 !

# Ejercicio

## Calcular tasa de aciertos

```
int v[1000]; // global
...
int i;
int s;
for (i=0; i < 1000; i++)
    s = s + v[i];
```

- ▶ **Ejemplo:**
  - ▶ Acceso a caché: 2 ns
  - ▶ Acceso a MP: 120 ns
  - ▶ Bloque de MP: 4 palabras
  - ▶ Transferencia de un bloque entre memoria principal y caché: 200 ns

```
.data
    v: .space 4000 # 4*1000

.text
main:
    li    t0, 0      # i
    li    t1, 0      # i de v
    li    t2, 1000   # num. eltos.
    li    t3, 0      # s
bucle: bge    t0, t2, fin
    lw    t4, v(t1)
    add   t3, t3, t4
    addi  t0, t0, 1
    addi  t1, t1, 4
    j     bucle
fin:     ...
```

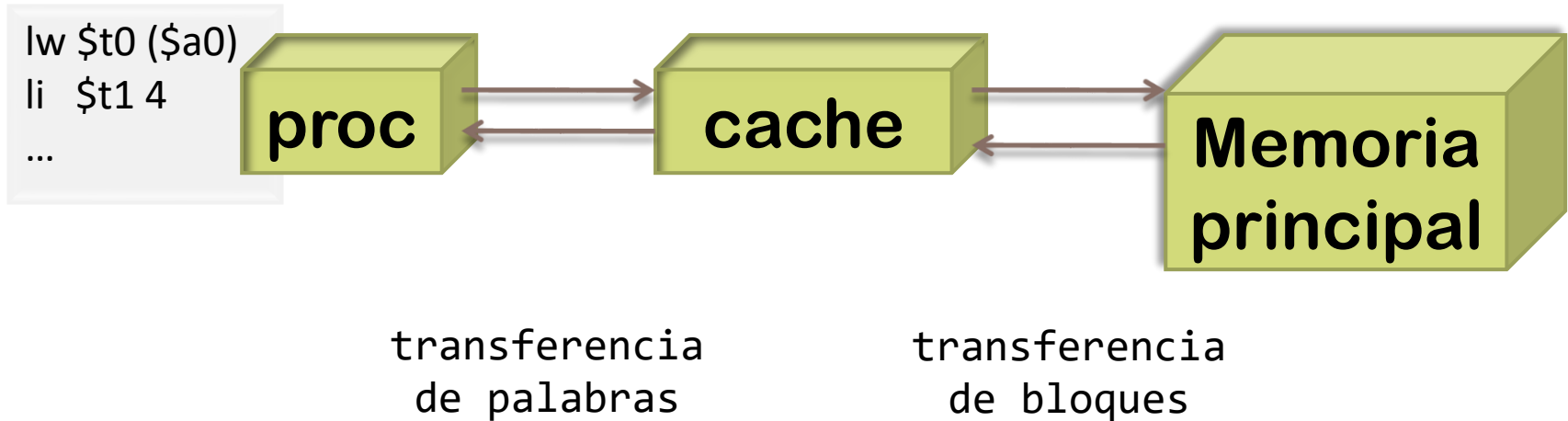
# ¿Por qué funciona?

- ▶ Tiempo de acceso a caché mucho menor que tiempo de acceso a memoria principal.
- ▶ A la memoria principal se accede por bloques.
- ▶ Cuando un programa accede a una dirección, es probable que vuelva a acceder a ella en el futuro cercano.
  - ▶ Proximidad o Localidad temporal.
- ▶ Cuando un programa accede a una dirección, es probable que en el futuro cercano acceda a posiciones cercanas.
  - ▶ Proximidad o Localidad espacial.
- ▶ Tasa de aciertos: probabilidad de que un dato accedido esté en la caché

**Tasa de aciertos elevada**

# Funcionamiento general

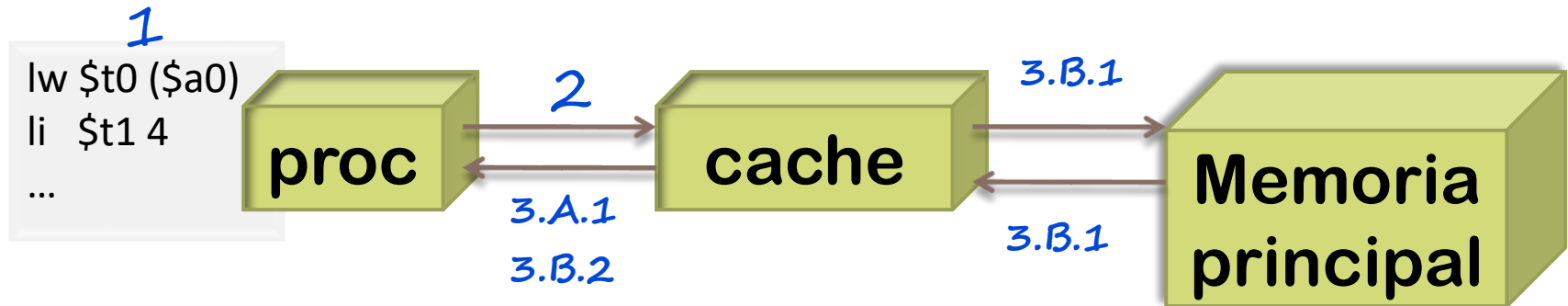
## resumen



- ▶ Se construye con tecnología SRAM
  - ▶ Integrada en el mismo procesador.
  - ▶ Más rápida y más cara que la memoria DRAM.
- ▶ Mantiene una **copia** de partes de la memoria principal.

# Funcionamiento general

## resumen



1. El procesador solicita contenidos de una posición (dirección) de memoria.

2. La caché comprueba si ya están los datos de esta posición:

**Si está (ACIERTO),**

**3.A.1** Se la sirve al procesador desde la caché (rápidamente).

**Si no está (FALLO),**

**3.B.1** La caché transfiere de memoria principal el bloque de palabras asociado a la posición.

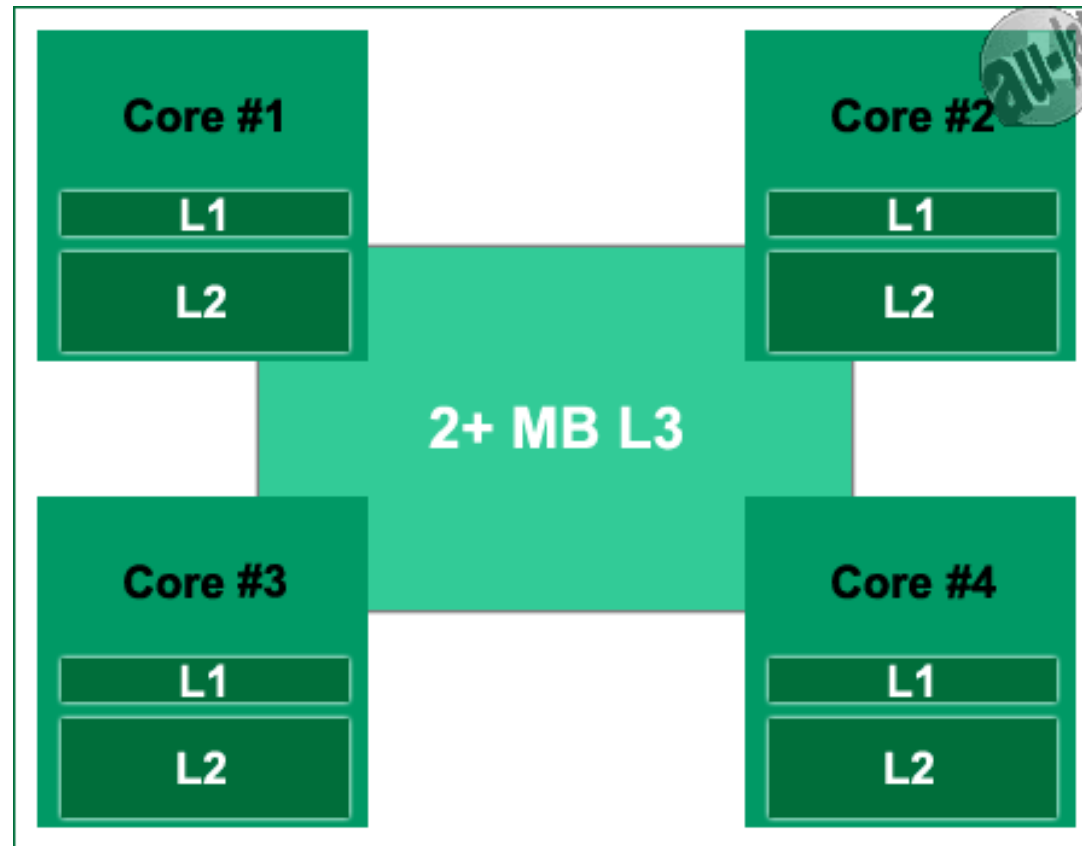
**3.B.2** Después, la caché entrega los datos pedidos al procesador.



# Niveles de memoria caché

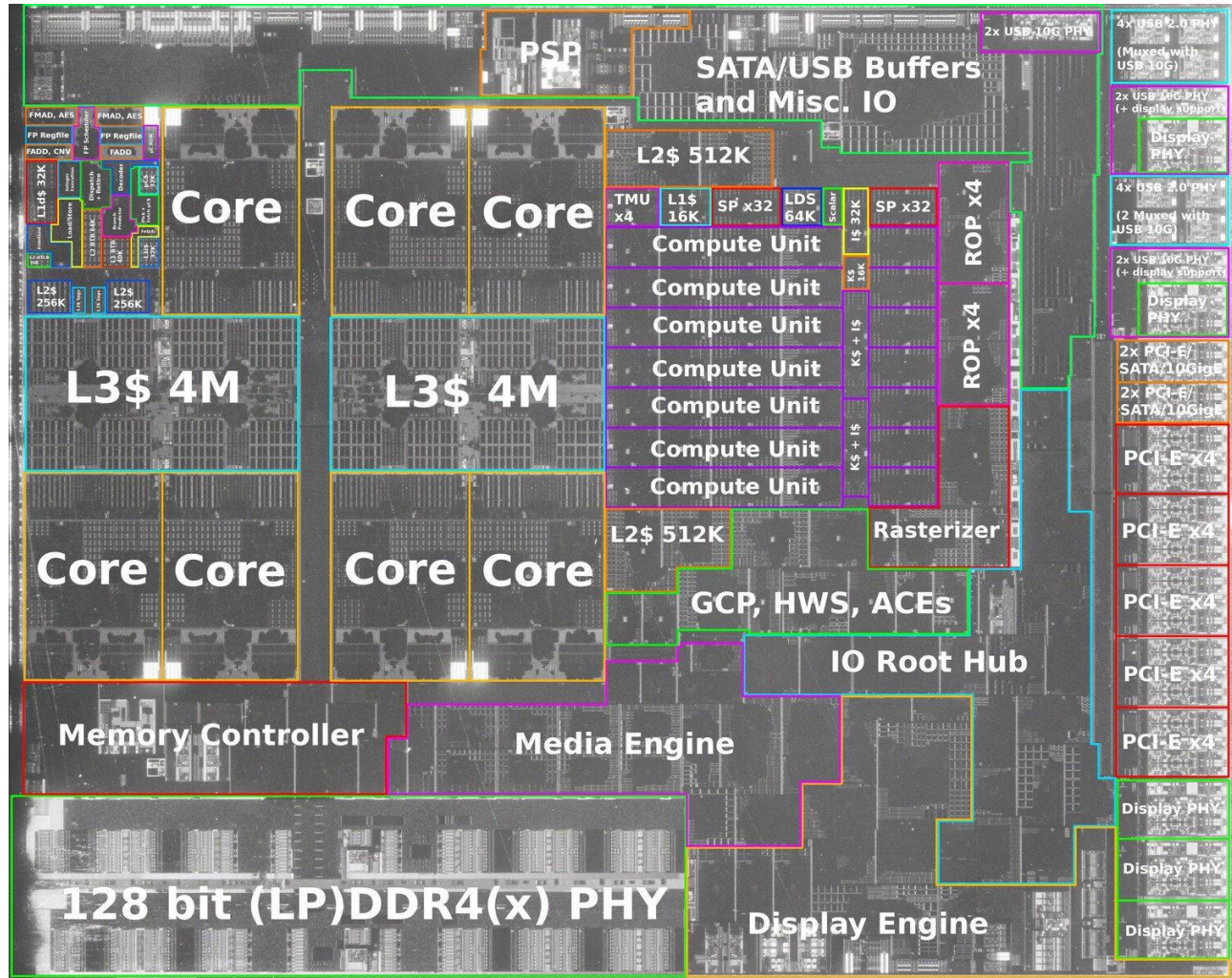
- ▶ Es habitual encontrar tres niveles:
  - ▶ **L1 o nivel 1:**
    - ▶ Caché interna: la más cercana al procesador
    - ▶ Tamaño pequeño (8KB-128KB) y máxima velocidad
    - ▶ Pueden separarse para instrucciones y datos
  - ▶ **L2 o nivel 2:**
    - ▶ Caché interna
    - ▶ Entre L1 y L3 (o entre L1 y M. Principal)
    - ▶ Tamaño mediano (256KB – 4MB) y menor velocidad que L1
  - ▶ **L3 o nivel 3:**
    - ▶ Típicamente último nivel antes de M. Principal
    - ▶ Tamaño mayor y menor velocidad que L2
    - ▶ Interna o externa al procesador

# Ejemplo: AMD quad-core



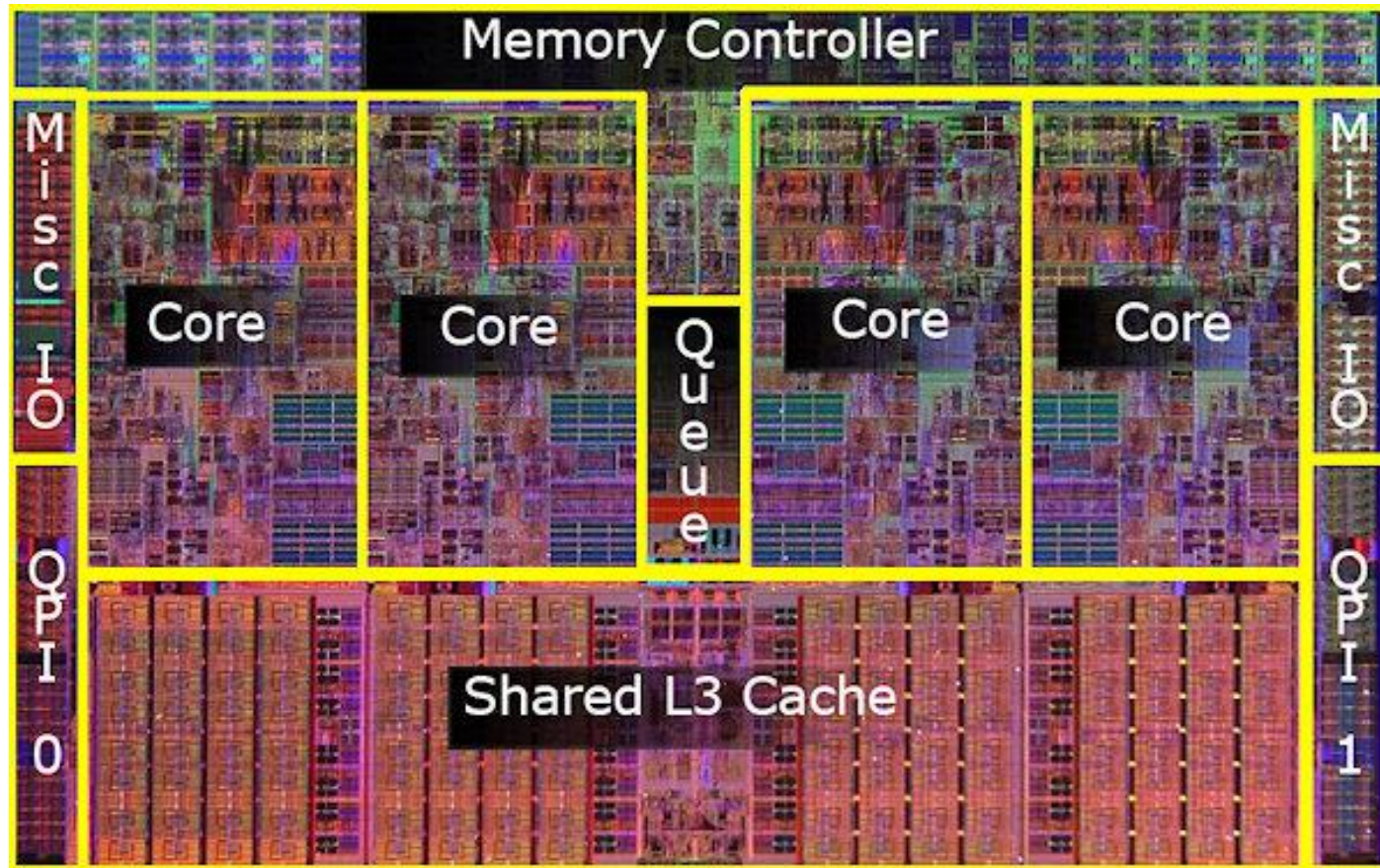
Quad-Core CPU mit gemeinsamen L3-Cache

# Ejemplo: AMD Ryzen 4000





# Ejemplo: Intel Core i7



# Contenidos

1. Tipos de memoria
2. Jerarquía de memoria
3. Memoria principal
4. Memoria caché
  1. Introducción
  2. Estructura de la memoria caché
  3. Diseño y organización de la memoria caché
5. Memoria virtual

# Acceso a una palabra en m. principal

Recordatorio

## ► Ejemplo:

- Computador de 32 bits
- Memoria direccionada por bytes
- Acceso a memoria principal por palabras
- Acceso a la palabra con dirección  
64 en decimal

Palabra de 32 bits

0				
4				
8				
12				
16				
20				
24				
28				
32				
36				
40				
44				
48				
52				
56				
60				
64				

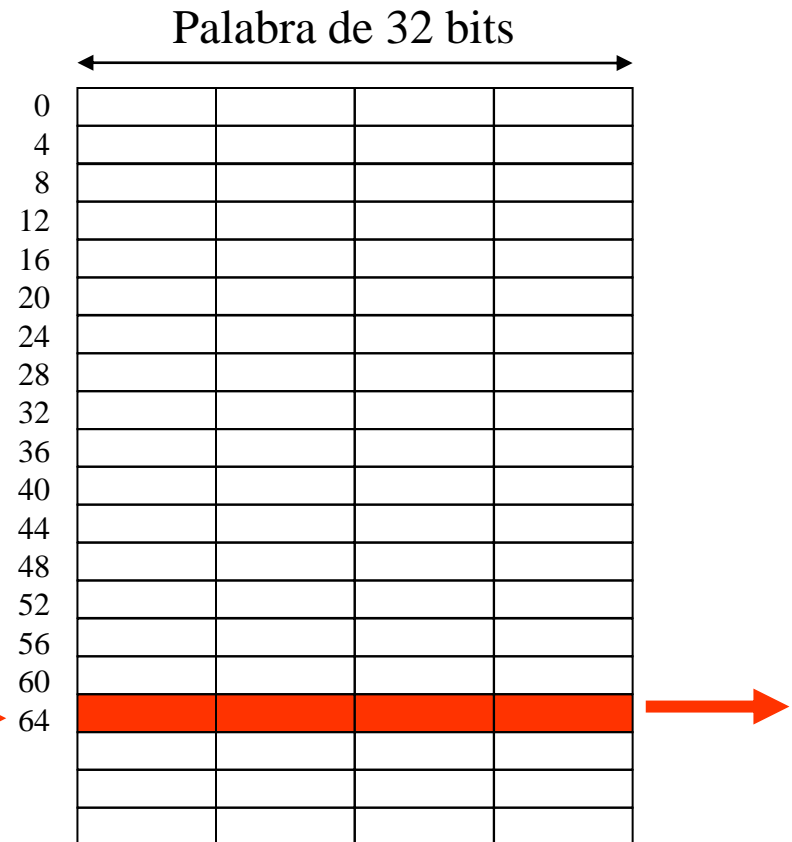
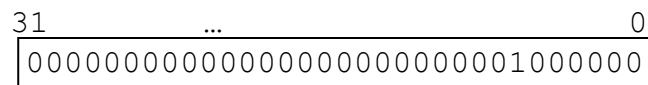
# Acceso a una palabra en m. principal

Recordatorio

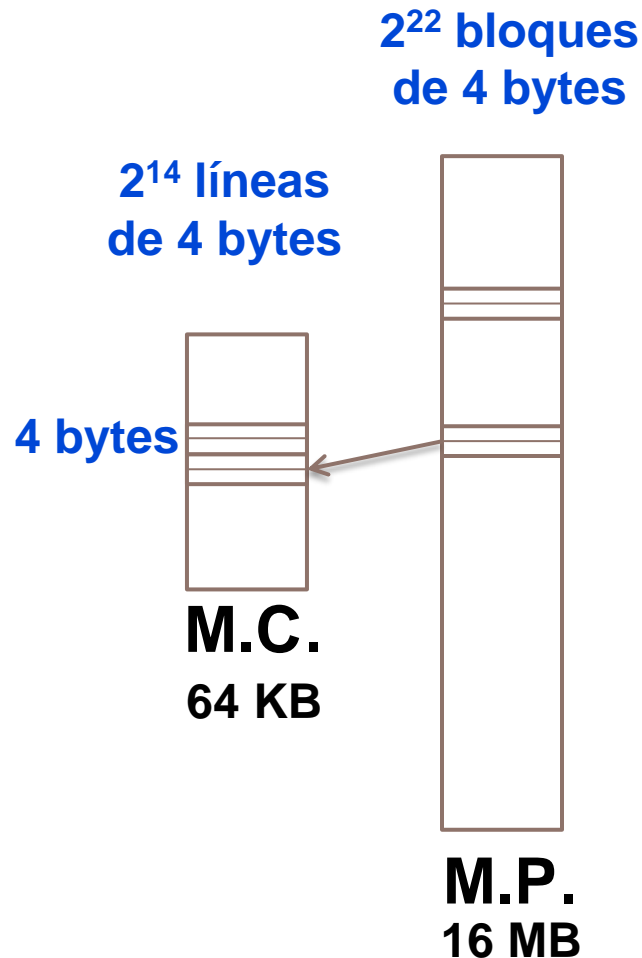
## ► Ejemplo:

- Computador de 32 bits
- Memoria direccionada por bytes
- Acceso a memoria principal por palabras
- Acceso a la palabra con dirección

64 en decimal



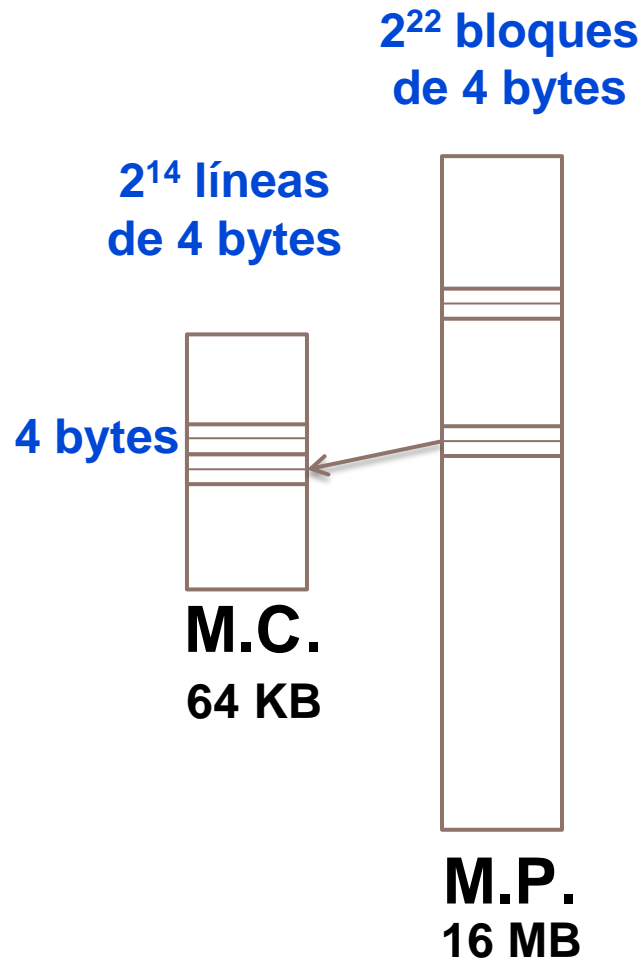
# Estructura de la memoria caché



- ▶ Se divide la M.P. y la M.C. (de forma lógica) en bloques de igual tamaño
  - ▶ El bloque en caché se le llama **línea**
- ▶ A cada bloque de M.P. le corresponderá **una línea de M.C.** (bloque en caché)
- ▶ El tamaño de la M.C. es menor:
  - ▶ El número de bloques en la memoria caché es pequeño.



# Estructura de la memoria caché

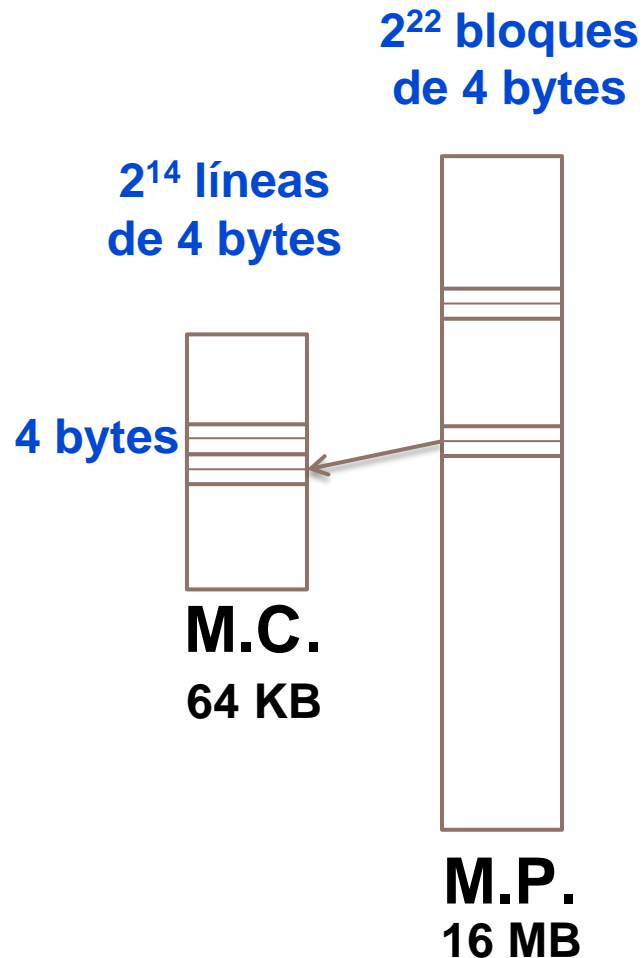


- ▶ Se divide la M.P. y la M.C. (de forma lógica) en bloques de igual tamaño
  - ▶ El bloque en caché se le llama **línea**
- ▶ A cada bloque de M.P. le corresponderá **una línea de M.C.** (bloque en caché)
- ▶ El tamaño de la M.C. es menor:
  - ▶ El número de bloques en la memoria caché es pequeño.

¿Cuántos bloques de 4 palabras caben en una m. caché de 64 KiB para una CPU de 32 bits?

- ▶ Solución:
$$2^6 \cdot 2^{10} \text{ bytes} / 2^4 \text{ bytes} = 2^{11} \text{ bloques} = 2048 \text{ bloques} = 2048 \text{ líneas}$$

# Estructura de la memoria caché



- ▶ Se divide la M.P. y la M.C. (de forma lógica) en bloques de igual tamaño
  - ▶ El bloque en caché se le llama **línea**
- ▶ A cada bloque de M.P. le corresponderá **una línea de M.C.** (bloque en caché)
- ▶ El tamaño de la M.C. es menor:
  - ▶ El número de bloques en la memoria caché es pequeño.

¿Cuántos bloques de 4 palabras de 4 bytes hay en una memoria de 1 GiB?

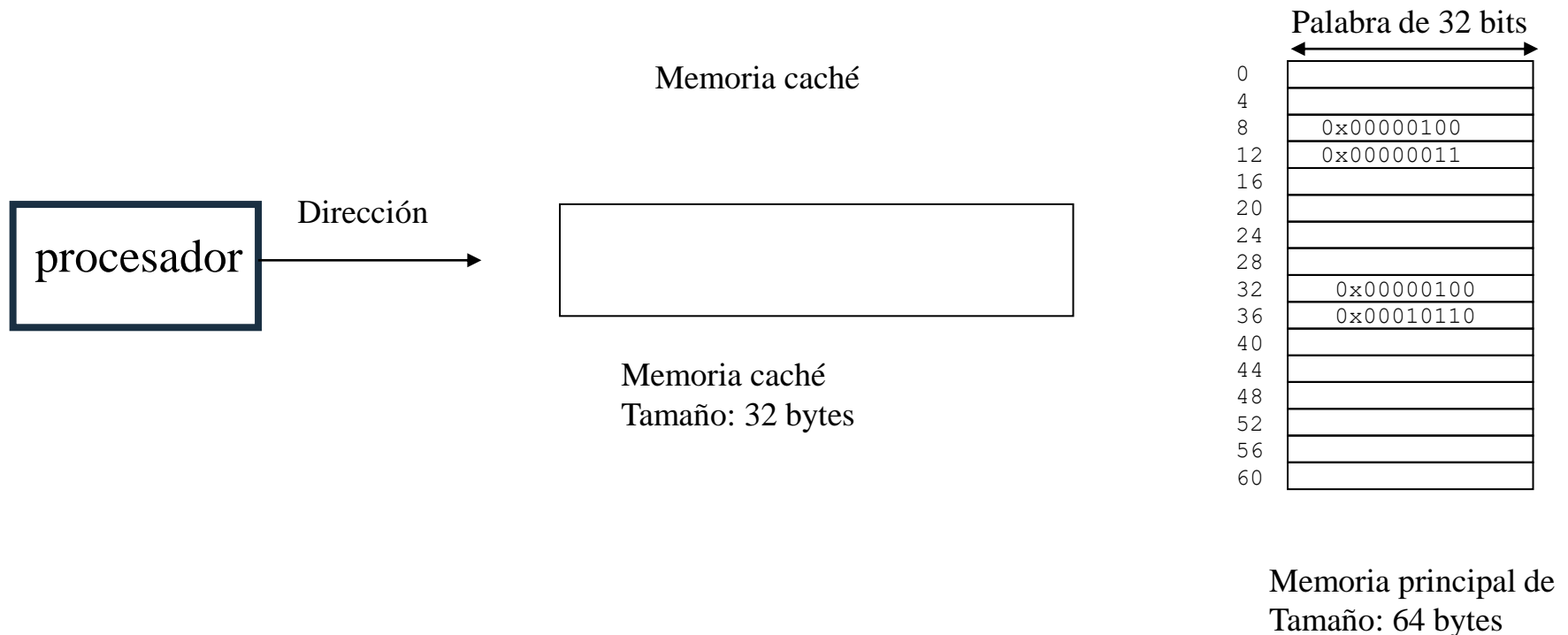
- ▶ Solución:

$$2^{30} \text{ b} / 2^4 \text{ b} = 2^{30-4} \text{ b} = 2^{26} \text{ b} = 64 \text{ megabloques} = \sim 64 \text{ millones}$$

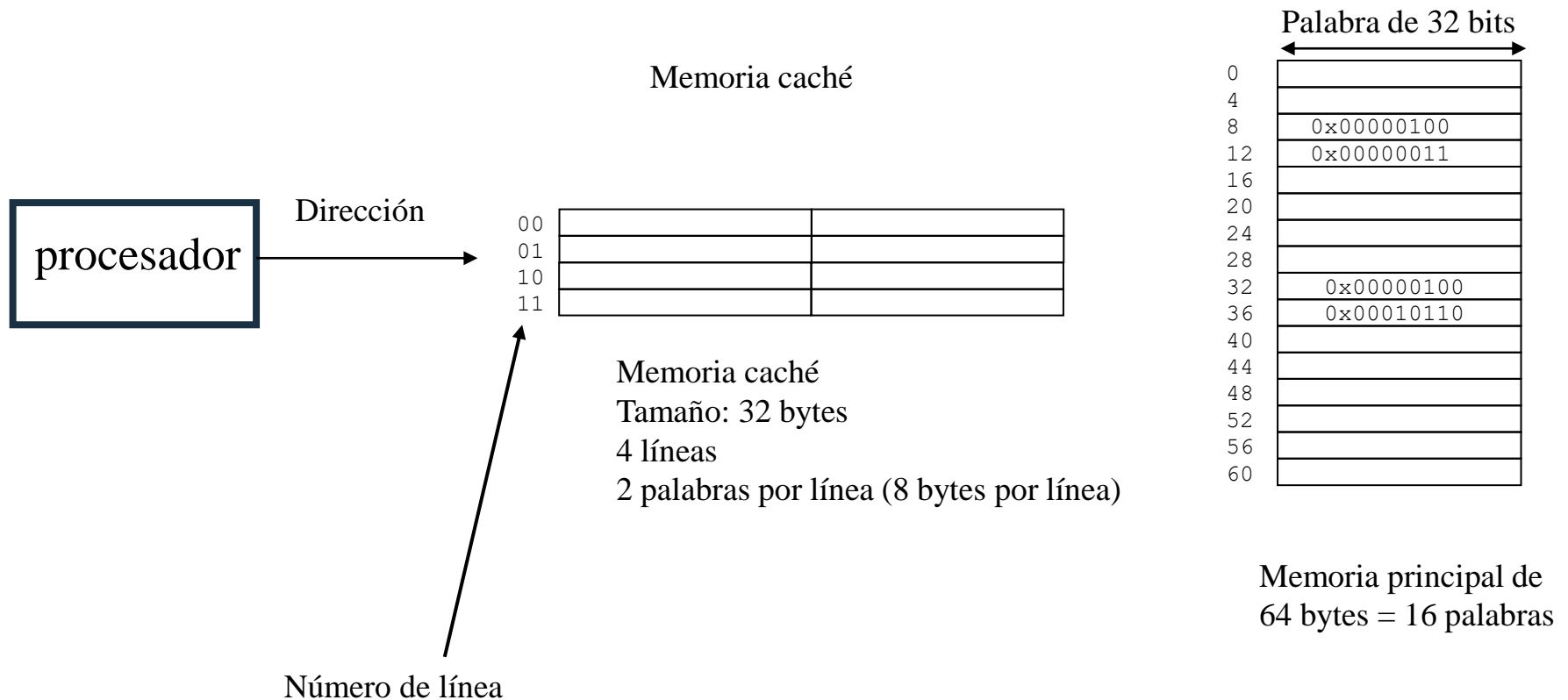
# ¿Cómo buscar una palabra en caché?

## Ejemplo:

Con líneas de dos palabras  
¿cuántas líneas tiene la caché?



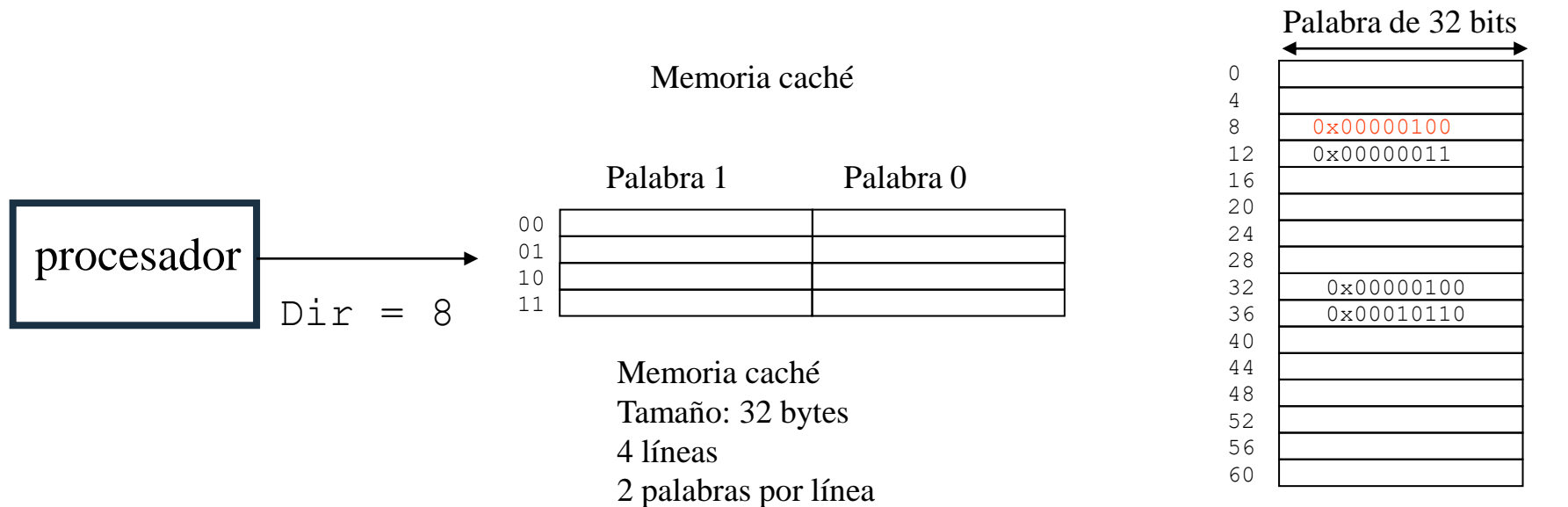
# ¿Cómo buscar una palabra en caché?



# ¿Cómo buscar una palabra en caché?



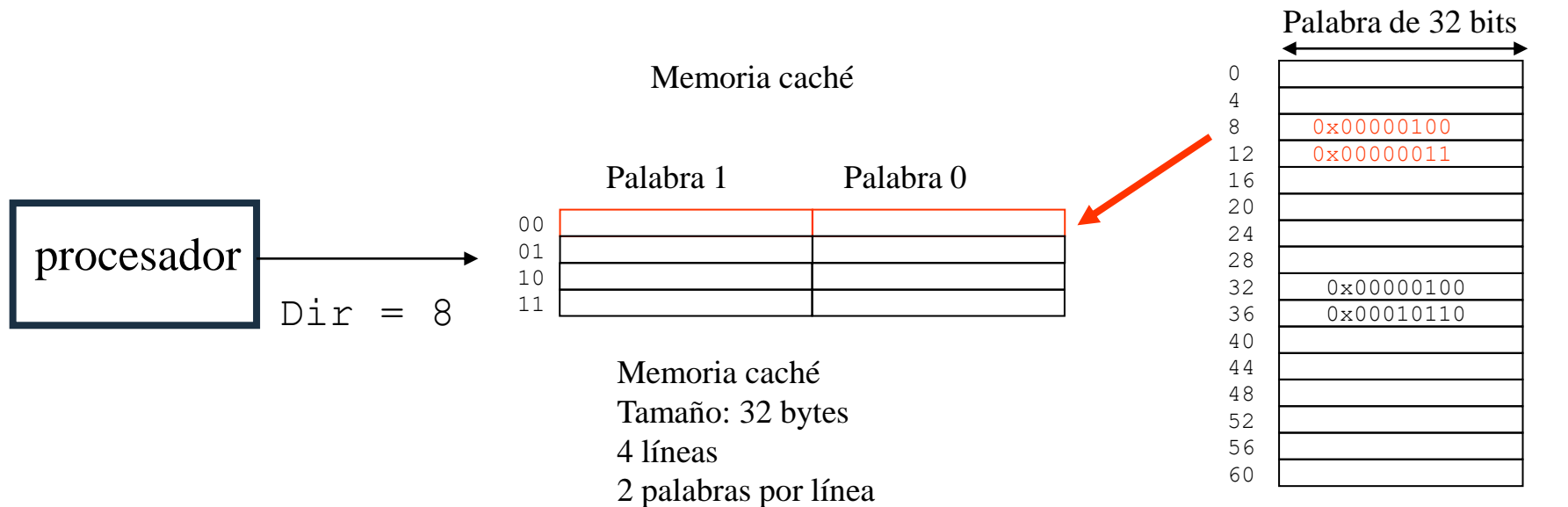
# ¿Cómo buscar una palabra en caché?



**FALLO**  
**¿Cómo se sabe?**

Memoria principal de  
64 bytes = 16 palabras

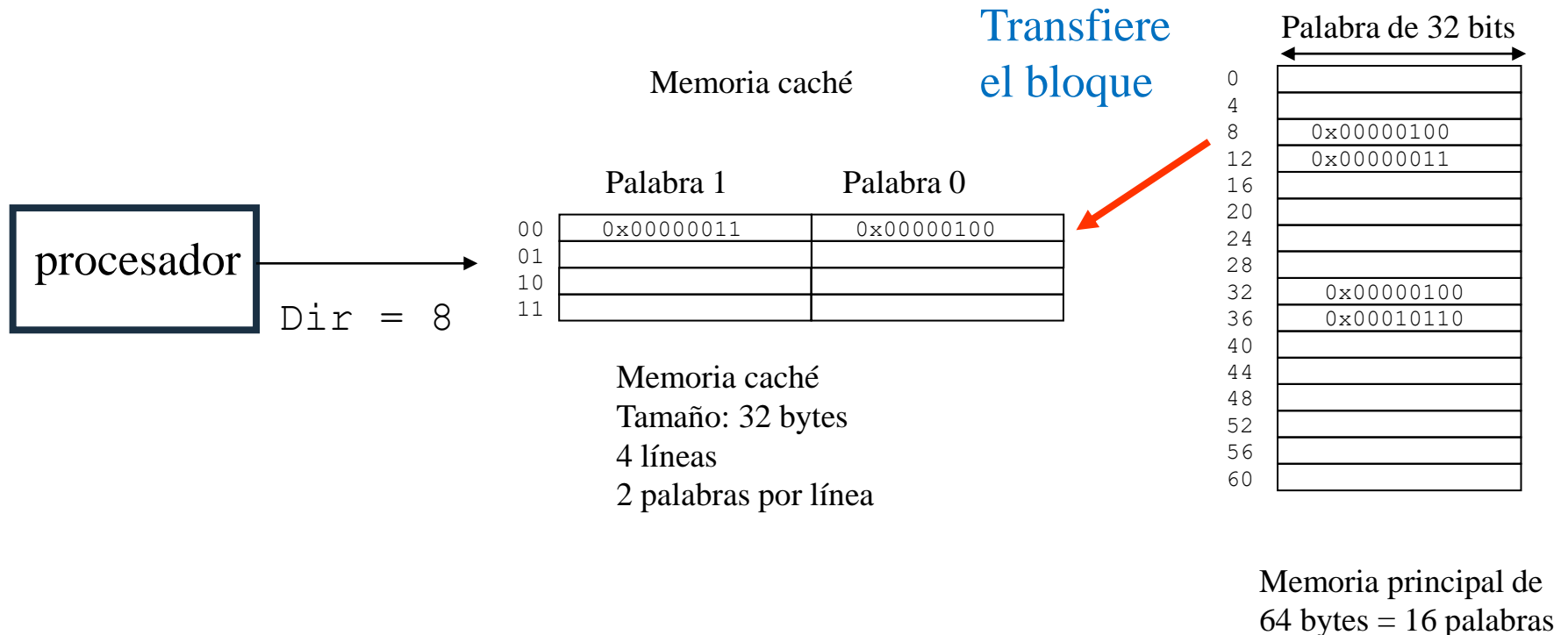
# ¿Cómo buscar una palabra en caché?



Se elige una línea en la caché  
¿Qué línea?

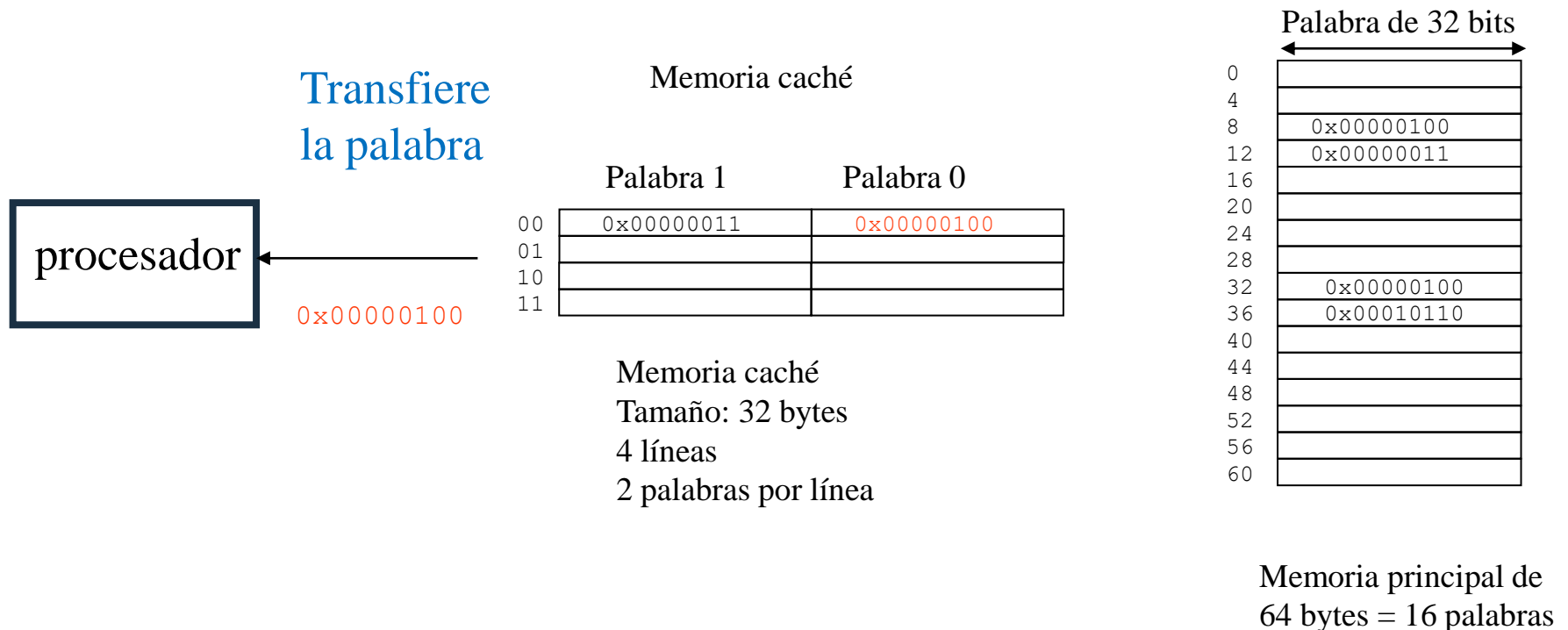
Memoria principal de  
64 bytes = 16 palabras

# ¿Cómo buscar una palabra en caché?





# ¿Cómo buscar una palabra en caché?

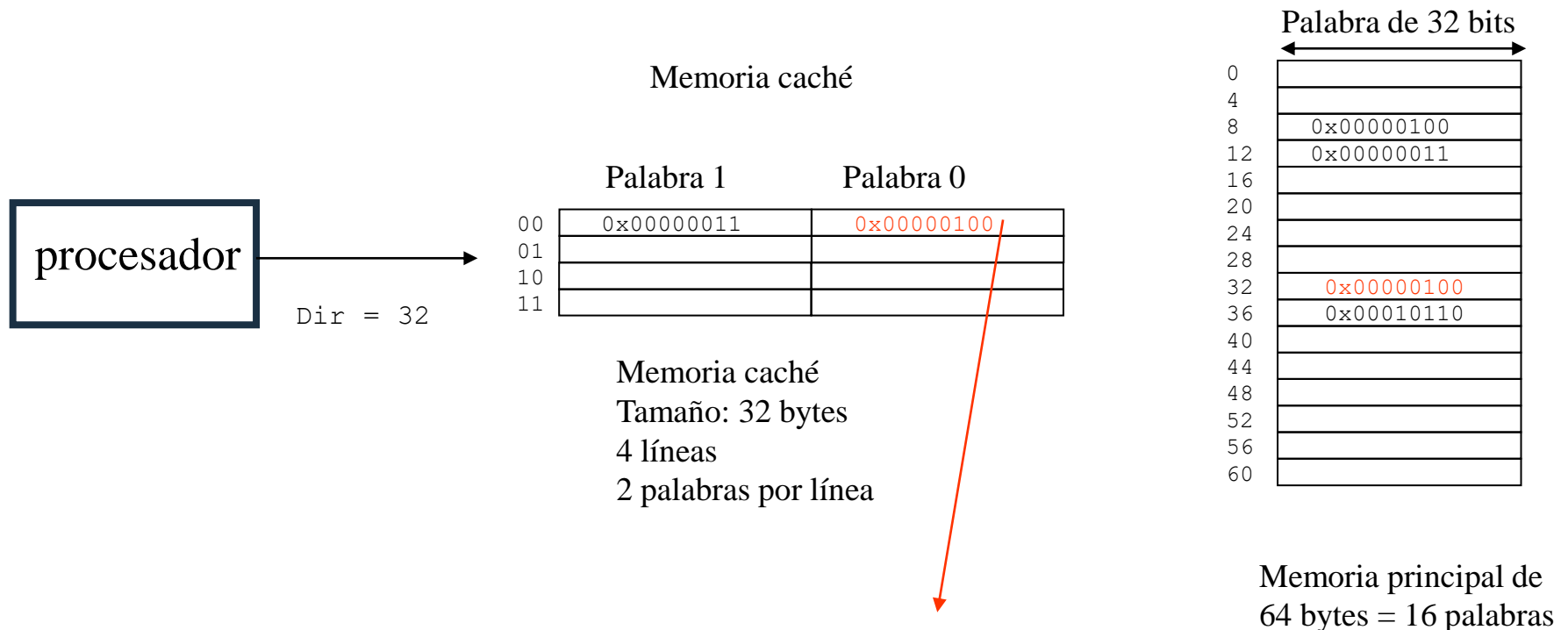


# ¿Cómo buscar una palabra en caché?



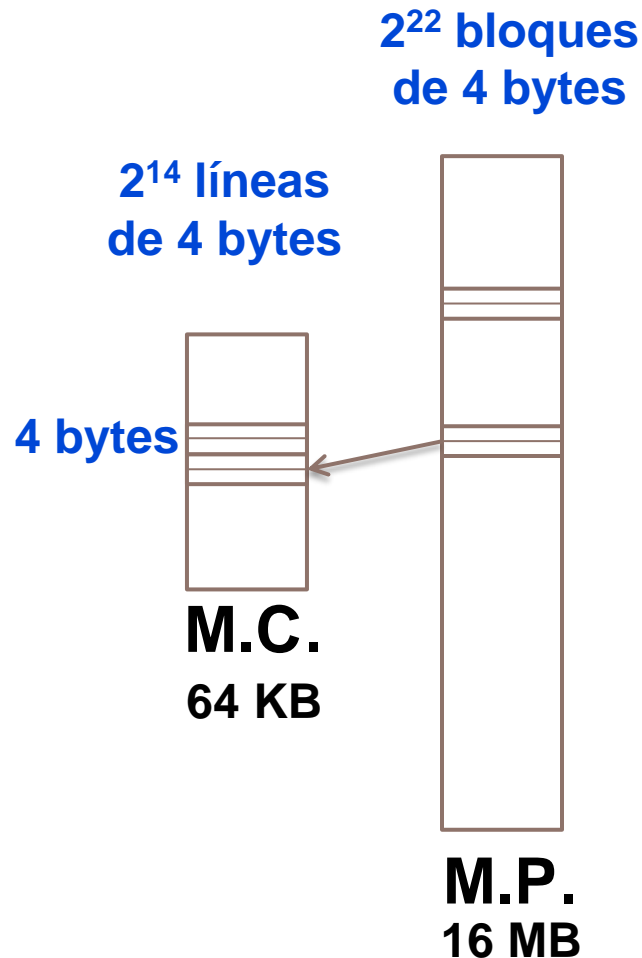
¿Cómo saber si está en la caché?

# ¿Cómo buscar una palabra en caché?



Recordando: el contenido es de la dirección 8 no de la 32

# Estructura de la memoria caché



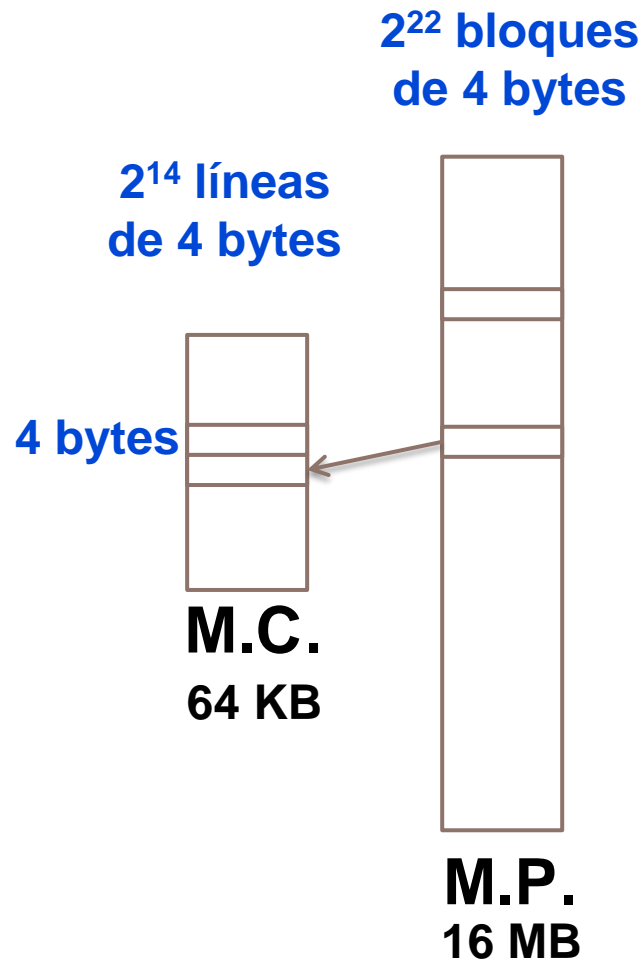
- ▶ Se divide la M.P. y la M.C. (de forma lógica) en bloques de igual tamaño
  - ▶ El bloque en caché se le llama **línea**
- ▶ A cada bloque de M.P. le corresponderá **una línea de M.C.** (bloque en caché)
- ▶ El tamaño de la M.C. es menor:
  - ▶ El número de bloques en la memoria caché es pequeño.

1. ¿Dónde se ubica un bloque de M.P.?
2. ¿Cómo se identifica un bloque de M.P.?
3. En caso de fallo y M.C. llena...  
¿Qué bloque debe remplazarse?
4. En caso de escritura...  
¿Qué debe actualizarse? ¿M.C.? ¿M.P. y M.C.?

# Contenidos

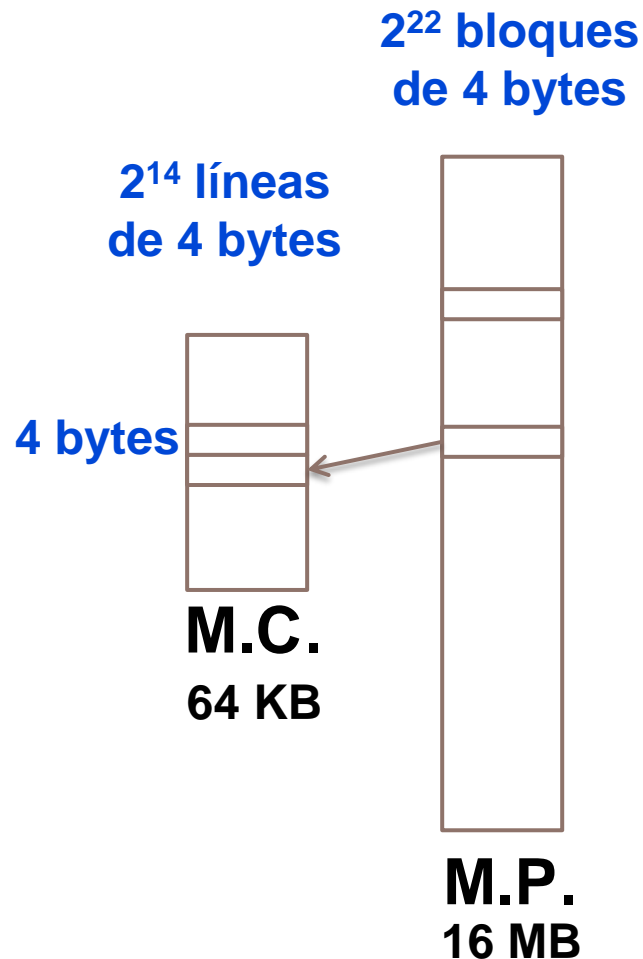
1. Tipos de memoria
2. Jerarquía de memoria
3. Memoria principal
4. Memoria caché
  1. Introducción
  2. Estructura de la memoria caché
  3. Diseño y organización de la memoria caché
5. Memoria virtual

# Estructura y diseño de la cache



- ▶ Se divide la M.P. y la M.C. en bloques de igual tamaño
- ▶ A cada bloque de M.P. le corresponderá **una línea de M.C.** (bloque en caché)

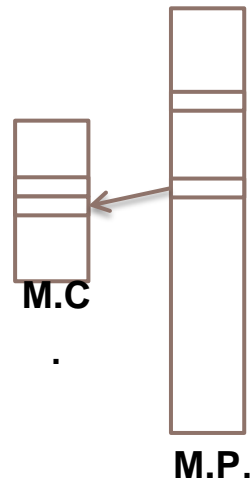
# Estructura y diseño de la cache



- ▶ Se divide la M.P. y la M.C. en bloques de igual tamaño
- ▶ A cada bloque de M.P. le corresponderá **una línea de M.C.** (bloque en caché)
- ▶ En el diseño se determina:
  - ▶ Tamaño
  - ▶ Función de correspondencia
  - ▶ Algoritmo de sustitución
  - ▶ Política de escritura
- ▶ Es habitual distintos diseños para L1, L2, ...

# Tamaño de caché

- ▶ El tamaño total y de las líneas en los que se organiza
- ▶ Se determina por estudios sobre códigos muy usados

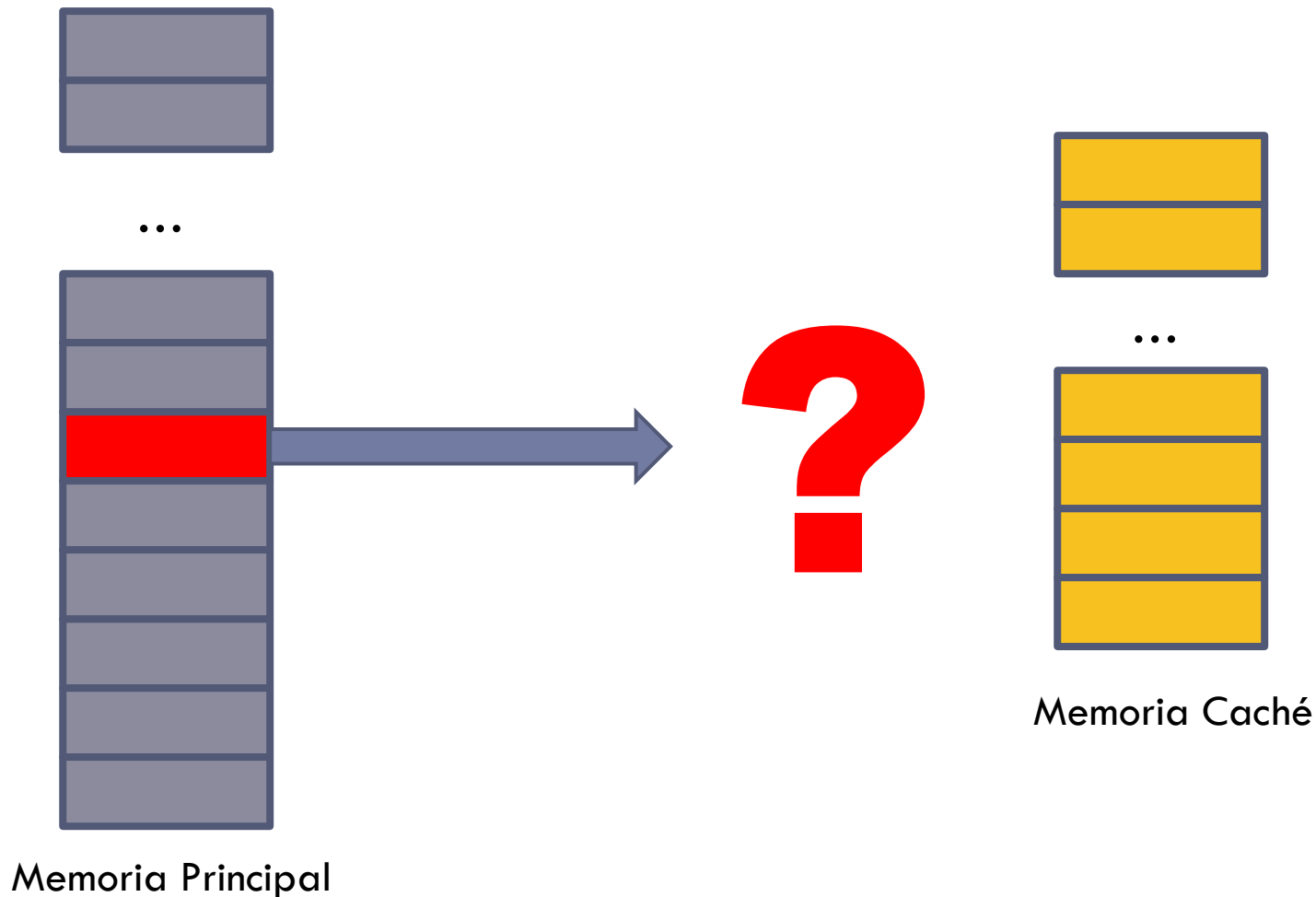




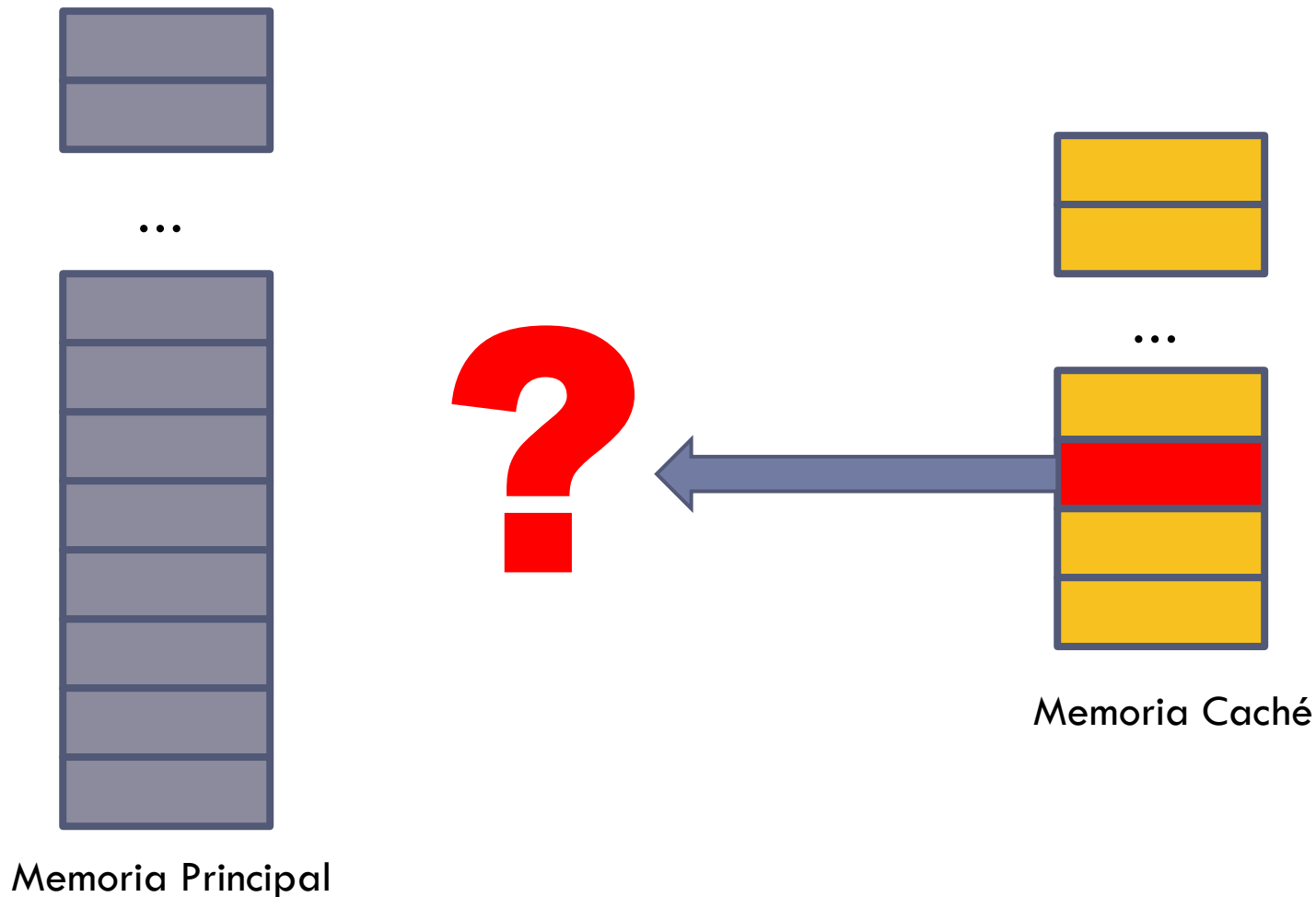
# Función de correspondencia

- ▶ Algoritmo que determina en qué lugares de la memoria caché se puede almacenar un bloque concreto de la memoria principal
- ▶ Un mecanismo que permita saber qué bloque concreto de memoria principal está en una línea de la memoria caché
  - ▶ Se asocian a las líneas etiquetas
  - ▶ Las etiquetas se basan en la dirección de comienzo de la línea

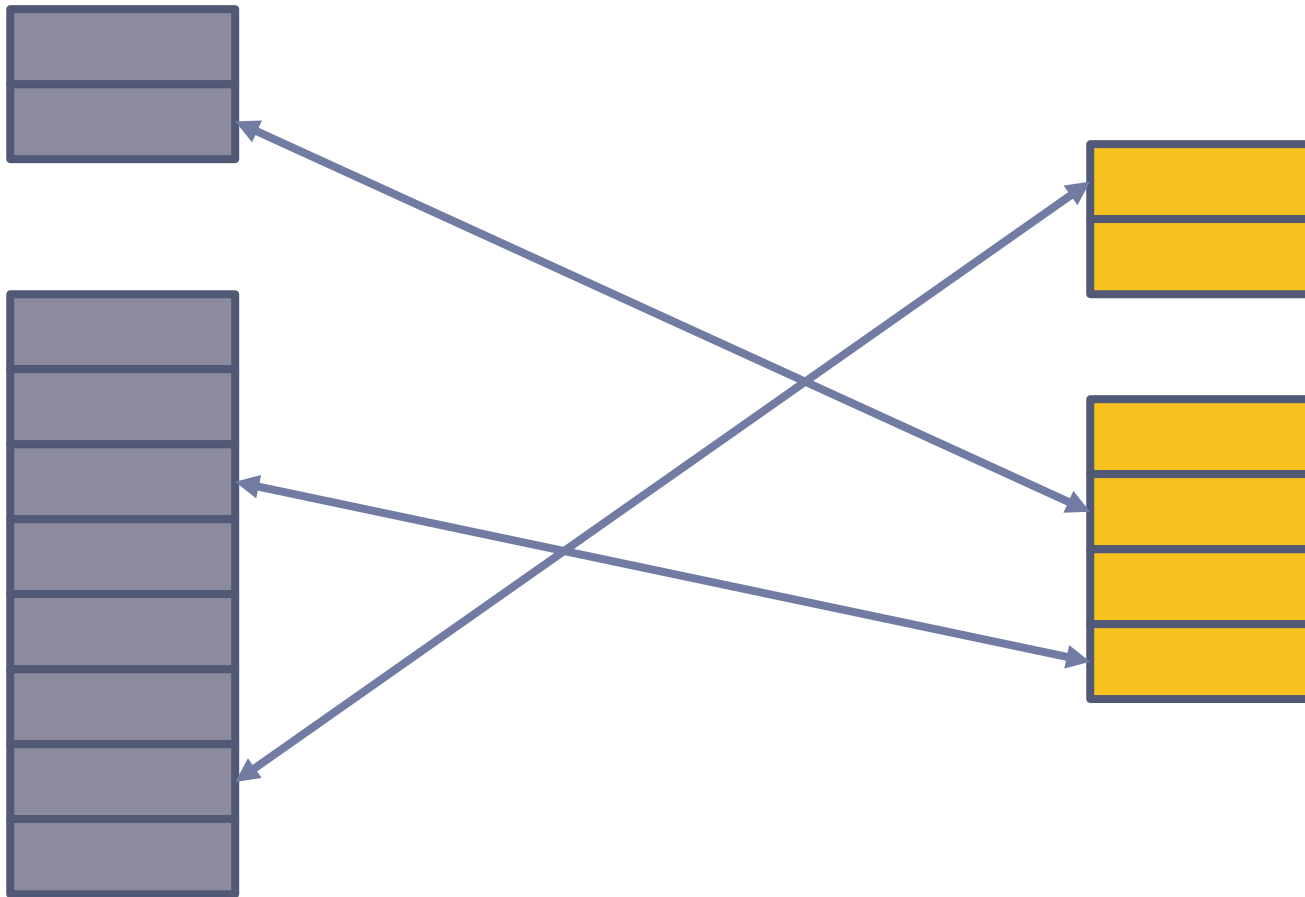
# Ubicación en caché



# Ubicación en memoria principal



# Función de correspondencia



¿Dónde están en caché los datos de una posición de M.P.?

# Funciones de correspondencia

- ▶ Función de correspondencia directa
- ▶ Función de correspondencia asociativa
- ▶ Función de correspondencia asociativa por conjuntos

# Correspondencia directa

00		
01		
10		
11		

Memoria caché  
Tamaño: 32 bytes  
4 líneas  
2 palabras por línea

## Memoria principal

Palabra de 32 bits

[illegible]

# Correspondencia directa

Bloque 0 - línea 0

00		
01		
10		
11		

Memoria caché  
Tamaño: 32 bytes  
4 líneas  
2 palabras por línea

## Memoria principal

Palabra de 32 bits

[illegible]

# Correspondencia directa

## Bloque 1 - línea 1

00		
01		
10		
11		

Memoria caché  
Tamaño: 32 bytes  
4 líneas  
2 palabras por línea

## Memoria principal

Palabra de 32 bits

[illegible]



# Correspondencia directa

Bloque 2 - línea 2

00		
01		
10		
11		

Memoria caché  
Tamaño: 32 bytes  
4 líneas  
2 palabras por línea

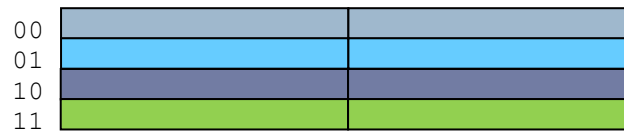
## Memoria principal

Palabra de 32 bits

[illegible]

# Correspondencia directa

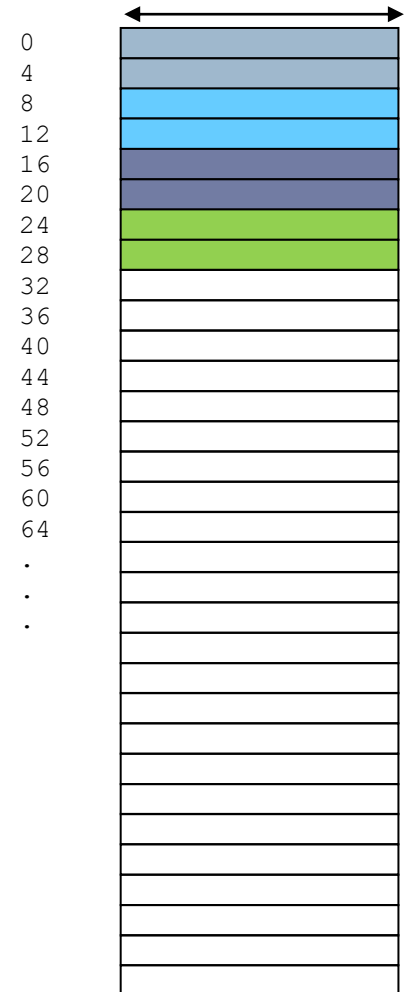
### Bloque 3 - línea 3



Memoria caché  
Tamaño: 32 bytes  
4 líneas  
2 palabras por línea

## Memoria principal

Palabra de 32 bits



# Correspondencia directa

## Bloque 4 - línea 0

00		
01		
10		
11		

Memoria caché  
Tamaño: 32 bytes  
4 líneas  
2 palabras por línea

## Memoria principal

Palabra de 32 bits

Diagram illustrating a memory layout or stack structure. The vertical axis is labeled with values from 0 to 64, with increments of 4. The horizontal axis is labeled with values from 0 to 4, with increments of 4. The diagram shows a stack of 32 horizontal bars, each 4 units high. The bars are color-coded: blue (0-3), light blue (4-7), dark blue (8-11), green (12-15), light green (16-19), and white (20-31). A double-headed arrow at the top indicates a width of 4 units.

# Correspondencia directa

- ▶ En general:

- ▶ El bloque de memoria  $K$  se almacena en la línea:

$K \bmod \text{número de líneas}$

# Correspondencia directa

00		
01		
10		
11		

Memoria caché  
Tamaño: 32 bytes  
4 líneas  
2 palabras por línea

Varios bloques en la misma línea

Memoria principal	
	Palabra de 32 bits
0000000	
0000100	
0001000	
0001100	
0010000	
0010100	
0011000	
0011100	
0100000	
0100100	
0101000	
0101100	
0110000	
0110100	
0111000	
0111100	
1000000	
1000100	
1001000	
1001100	
1010000	
1010100	
1011000	
1011100	
1100000	
1100100	
1101000	
1101100	
1110000	
1110100	
1111000	
1111100	

# Correspondencia directa

00		
01		
10		
11		

Memoria caché  
Tamaño: 32 bytes  
4 líneas  
2 palabras por línea

¿Cómo se sabe **qué** bloque de memoria se encuentra una determinada línea?  
Ejemplo: la dirección 0100100

Memoria principal	
	Palabra de 32 bits
0000000	
0000100	
0001000	
0001100	
0010000	
0010100	
0011000	
0011100	
0100000	
0100100	
0101000	
0101100	
0110000	
0110100	
0111000	
0111100	
1000000	
1000100	
1001000	
1001100	
1010000	
1010100	
1011000	
1011100	
1100000	
1100100	
1101000	
1101100	
1110000	
1110100	
1111000	
1111100	

# Correspondencia directa

00		
01		
10		
11		

Memoria caché  
Tamaño: 32 bytes  
4 líneas  
2 palabras por línea

¿Cómo se sabe **qué** bloque de memoria se encuentra una determinada línea?

Ejemplo: la dirección 0100100

**Se añade a cada línea una etiqueta**

Memoria principal	
	Palabra de 32 bits
0000000	
0000100	
0001000	
0001100	
0010000	
0010100	
0011000	
0011100	
0100000	
0100100	
0101000	
0101100	
0110000	
0110100	
0111000	
0111100	
1000000	
1000100	
1001000	
1001100	
1010000	
1010100	
1011000	
1011100	
1100000	
1100100	
1101000	
1101100	
1110000	
1110100	
1111000	
1111100	

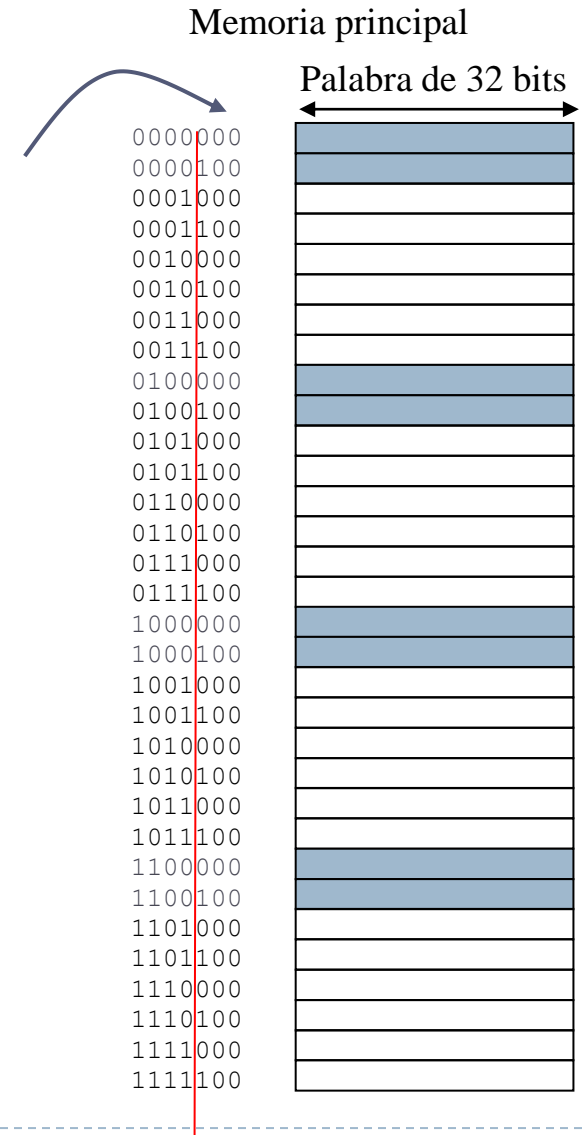
# Correspondencia directa

## Idea

¿qué byte dentro de la línea?  
Líneas de 8 bytes

00		
01		
10		
11		

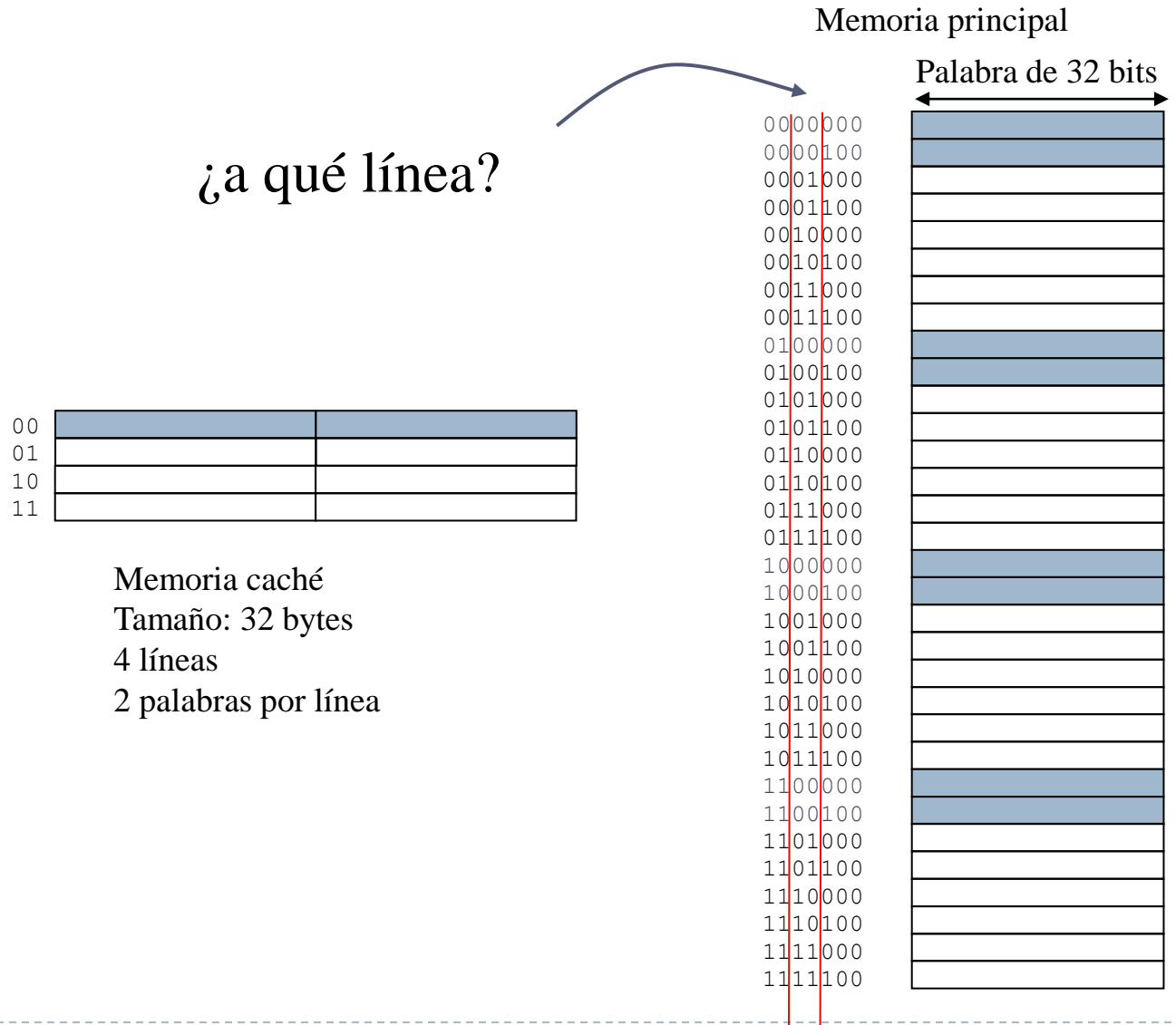
Memoria caché  
Tamaño: 32 bytes  
4 líneas  
2 palabras por línea





# Correspondencia directa

## Idea



# Correspondencia directa

## Idea

etiqueta asociada a la línea  
que diferencia los bloques  
que van a la misma línea

00			
01			
10			
11			

Memoria caché  
Tamaño: 32 bytes  
4 líneas  
2 palabras por línea

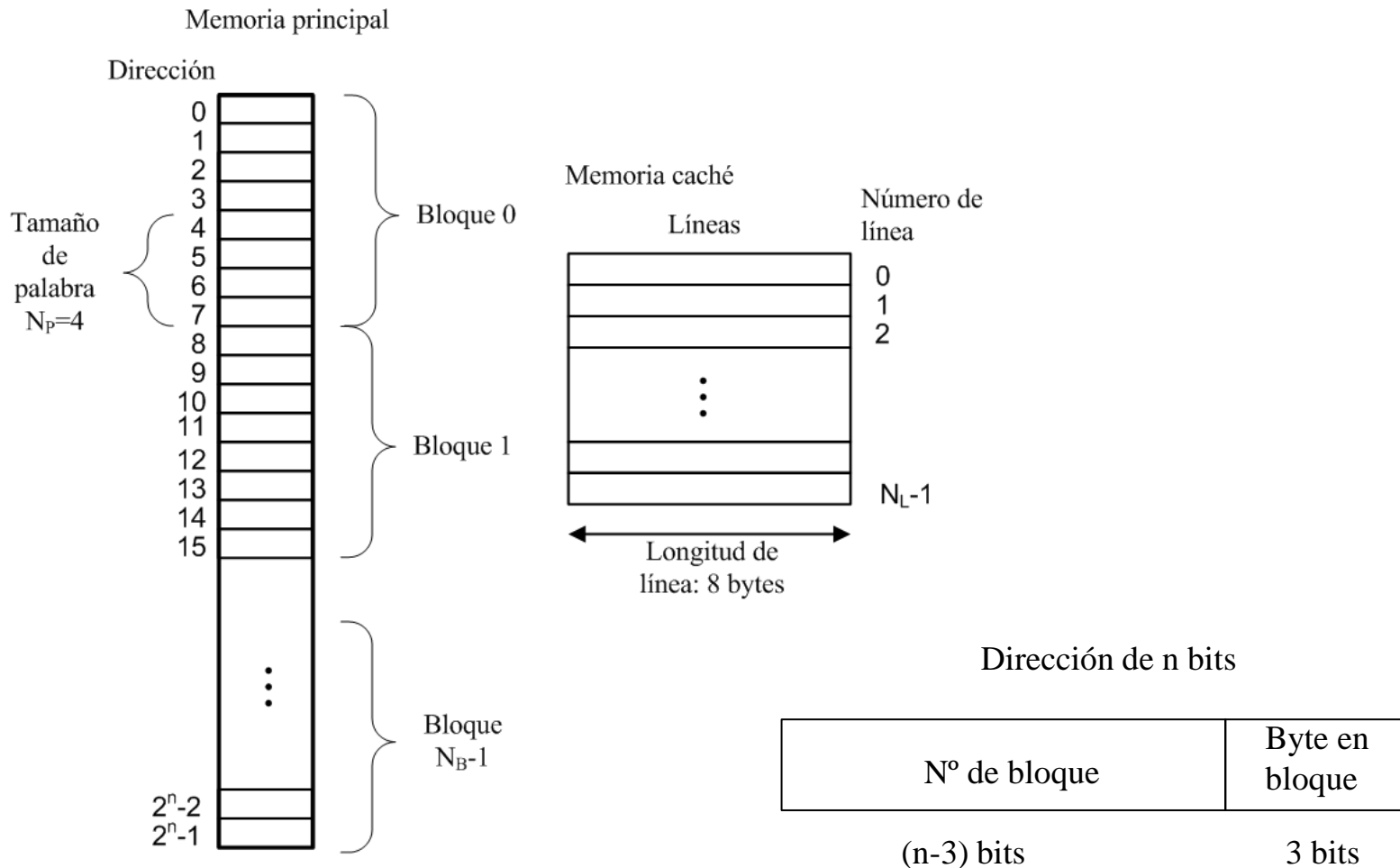
La etiqueta (bits superiores de la dirección)  
se almacena también en la memoria caché

Memoria principal

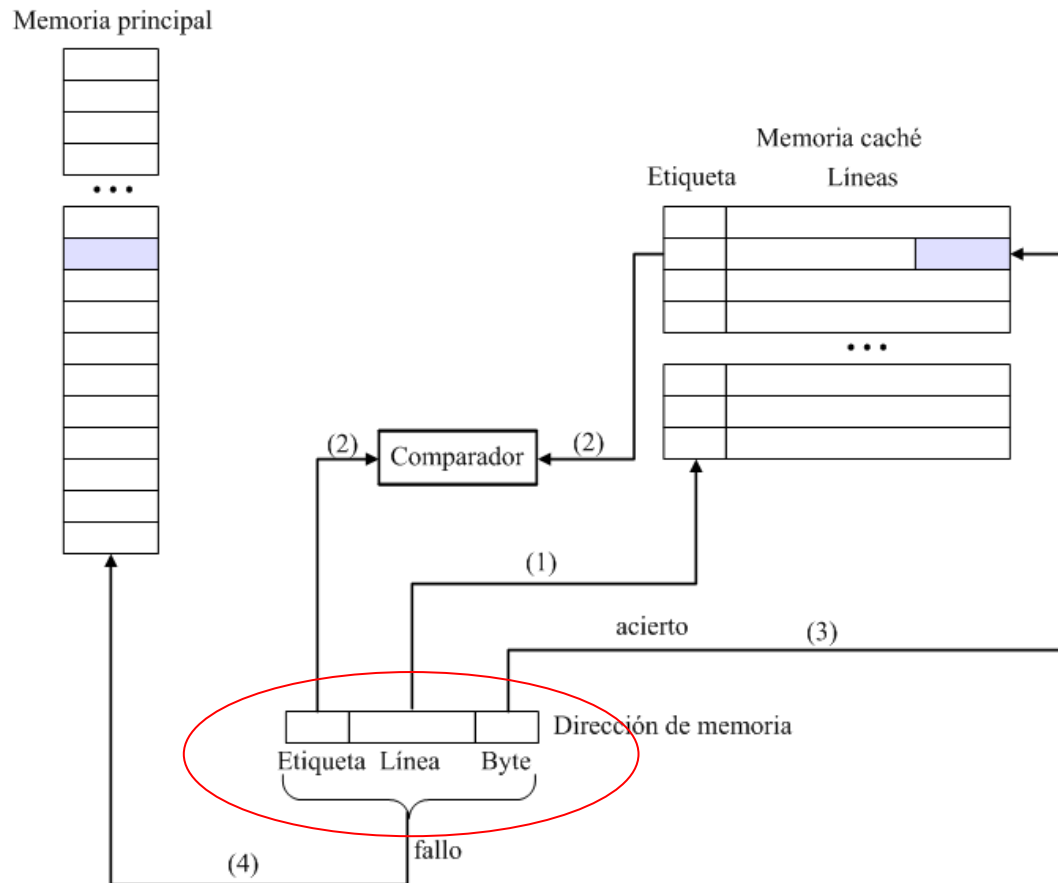
Palabra de 32 bits

00	00000	
00	00100	
00	01000	
00	01100	
00	10000	
00	10100	
00	11000	
00	11100	
01	00000	
01	00100	
01	01000	
01	01100	
01	10000	
01	10100	
01	11000	
01	11100	
10	00000	
10	00100	
10	01000	
10	01100	
10	10000	
10	10100	
10	11000	
10	11100	
11	00000	
11	00100	
11	01000	
11	01100	
11	10000	
11	10100	
11	11000	
11	11100	

# Ejemplo de organización de la memoria caché



# Organización de una memoria caché con correspondencia directa



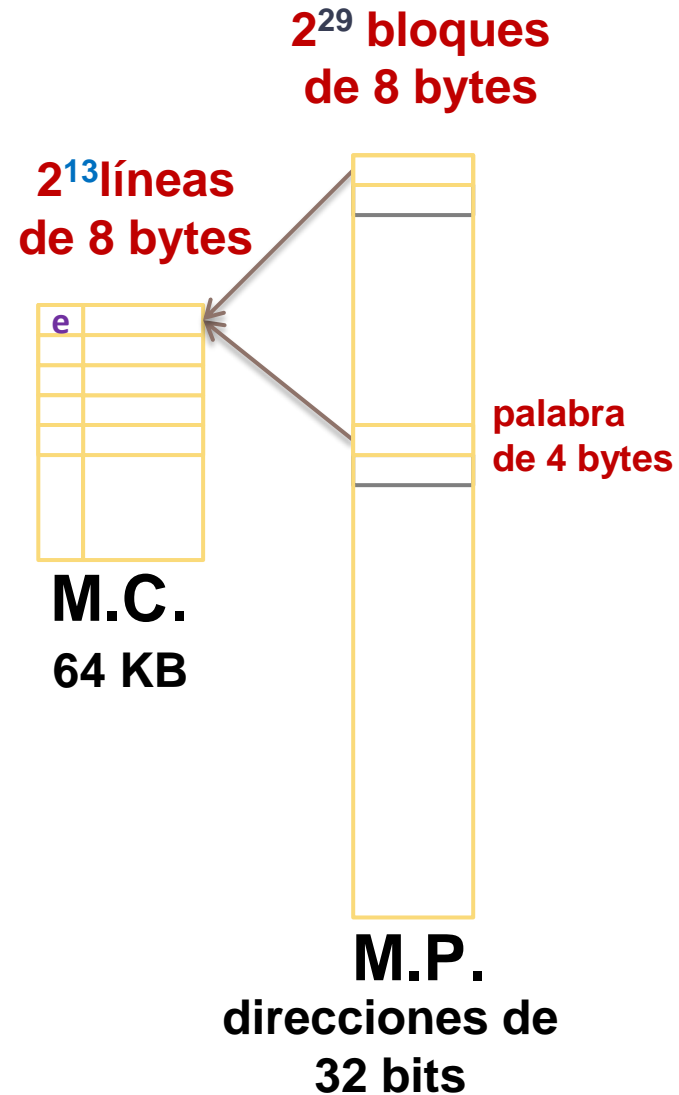
# Función de correspondencia directa

## Ejemplo

- ▶ Cada bloque de M.P. le corresponde una sola línea de caché (siempre la misma)
- ▶ La dirección de M.P. la determina:

32-16	13	3
etiqueta	línea	byte

- ▶ Si en 'línea' está 'etiqueta', entonces está el bloque en caché
- ▶ Simple, poco costosa, pero puede provocar muchos fallos dependiendo del patrón de accesos

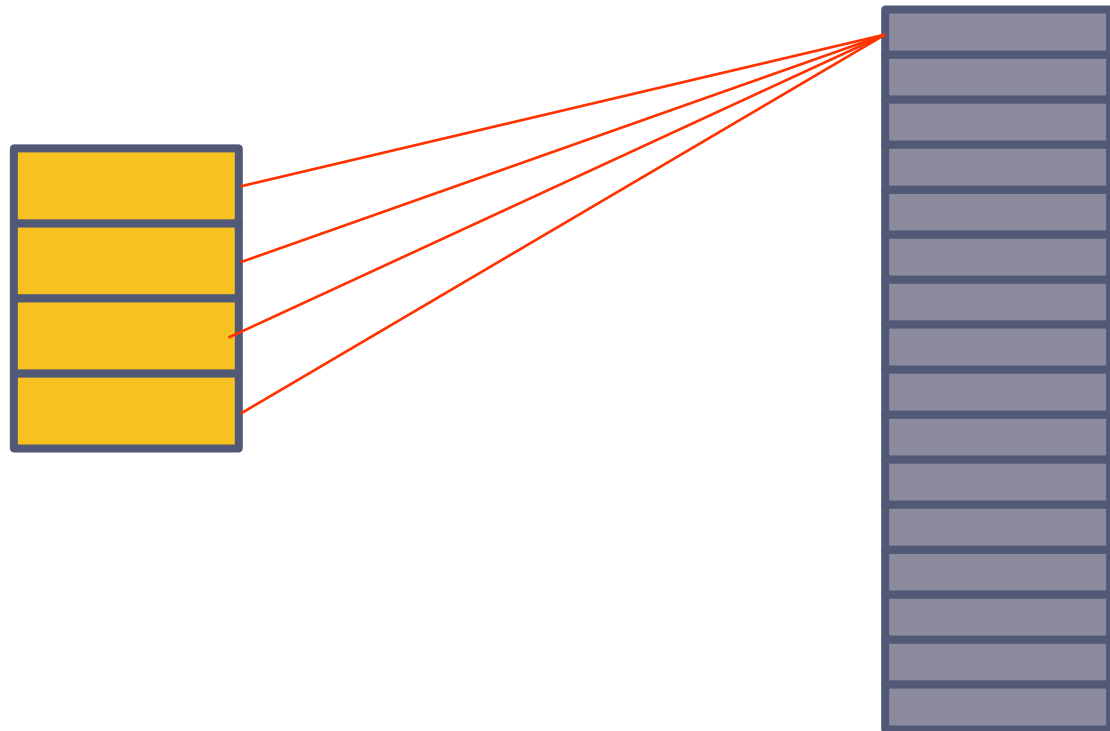


# Ejercicio

- ▶ Dado un computador de 32 bits con una memoria caché de 64 KB y bloques de 32 bytes. Si se utiliza correspondencia directa
  - ▶ ¿En qué línea de la memoria caché se almacena la palabra de la dirección 0x0000408A?
  - ▶ ¿Cómo se puede obtener rápidamente?
  - ▶ ¿En qué línea de la memoria caché se almacena la palabra de la dirección 0x1000408A?
  - ▶ ¿Cómo sabe la caché si la palabra almacenada en esa línea corresponde a la palabra de la dirección 0x0000408A o a la palabra de la dirección 0x1000408A?

# Correspondencia asociativa

- ▶ Cada bloque de MP puede almacenarse en cualquier línea de la caché



# Correspondencia asociativa

## Idea

etiqueta asociada a la línea  
que diferencia los bloques  
que van a la misma línea

00			
01			
10			
11			

Memoria caché  
Tamaño: 32 bytes  
4 líneas  
2 palabras por línea

La etiqueta (bits superiores de la dirección)  
se almacena también en la memoria caché

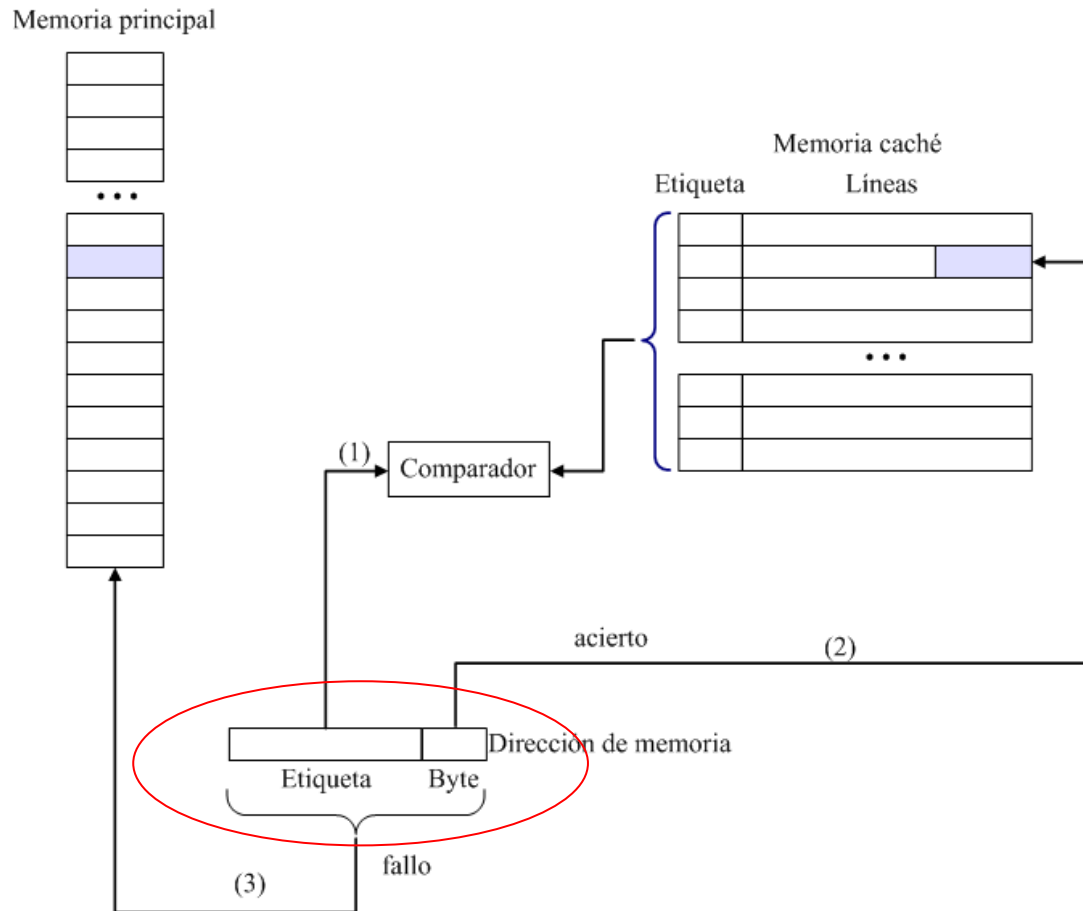
Memoria principal

Palabra de 32 bits

0000	000	
0000	100	
0001	000	
0001	100	
0010	000	
0010	100	
0011	000	
0011	100	
0100	000	
0100	100	
0101	000	
0101	100	
0110	000	
0110	100	
0111	000	
0111	100	
1000	000	
1000	100	
1001	000	
1001	100	
1010	000	
1010	100	
1011	000	
1011	100	
1100	000	
1100	100	
1101	000	
1101	100	
1110	000	
1110	100	
1111	000	
1111	100	



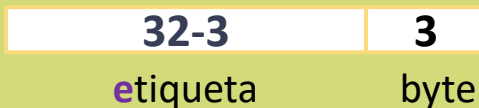
# Organización de una memoria caché con correspondencia asociativa



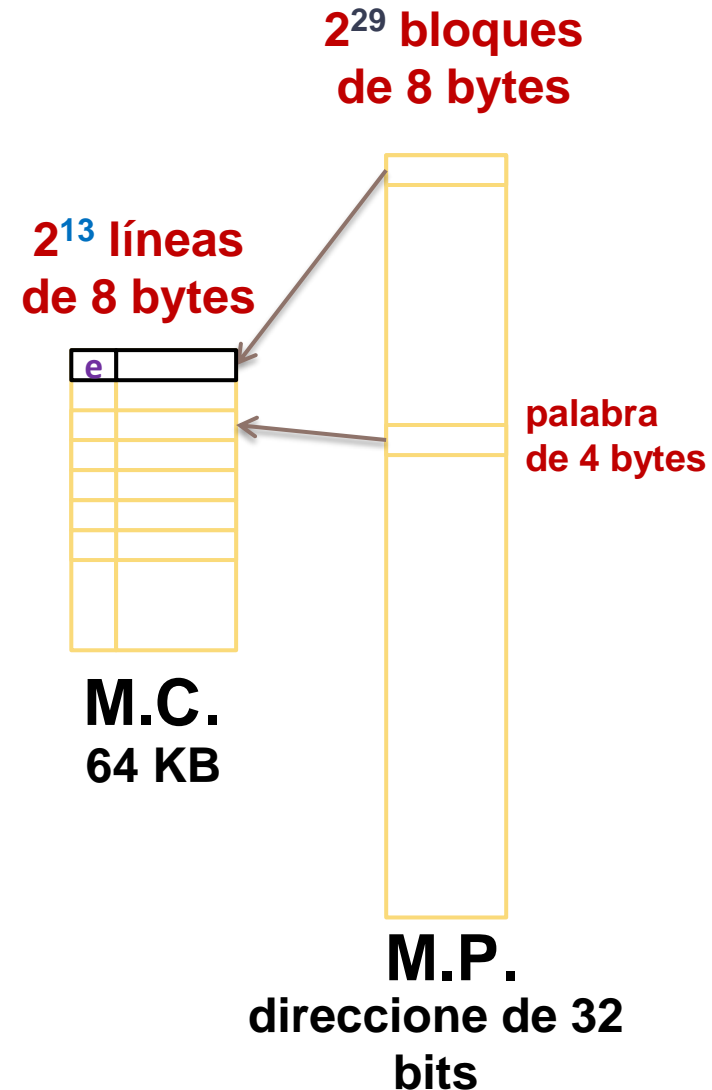
# Función de correspondencia asociativa

## Ejemplo

- ▶ Un bloque de M.P. puede cargarse en cualquier línea de caché
- ▶ La dir. de M.P. se interpreta como:



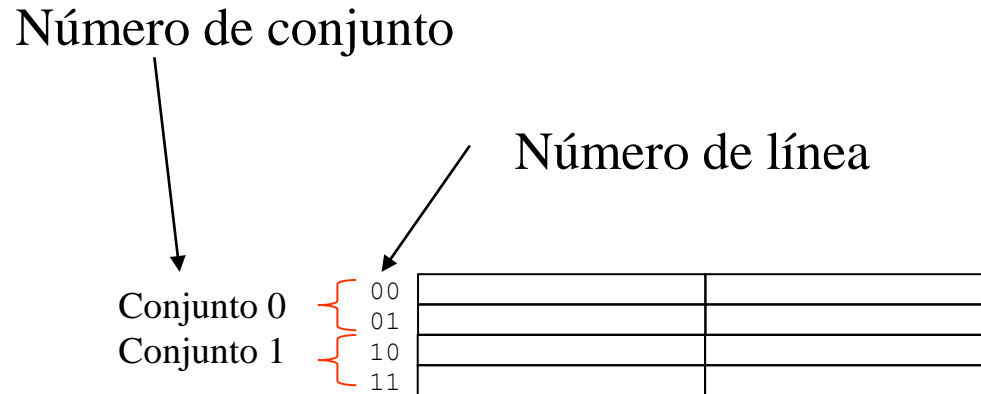
- ▶ Si hay una línea con 'etiqueta' en la caché, está allí el bloque
- ▶ Independiente del patrón de acceso, búsqueda costosa
- ▶ Etiquetas más grandes: cachés más grandes



# Correspondencia asociativa por conjuntos

- ▶ La memoria se organiza en **conjuntos** de líneas
- ▶ Una memoria **caché asociativa por conjunto de K vías**:
  - ▶ Cada conjunto almacena K líneas
- ▶ Cada bloque siempre se almacena en el mismo conjunto...
  - ▶ El bloque B se almacena en el conjunto:
    - ▶  $B \bmod$  número de conjuntos
- ▶ ...Dentro de un conjunto el bloque se puede almacenar en cualquiera de las líneas de ese conjunto

# Correspondencia asociativa por conjuntos



Memoria caché  
Tamaño: 32 bytes  
Asociativa por conjunto de 2 vías  
2 líneas por conjunto  
2 palabras por línea

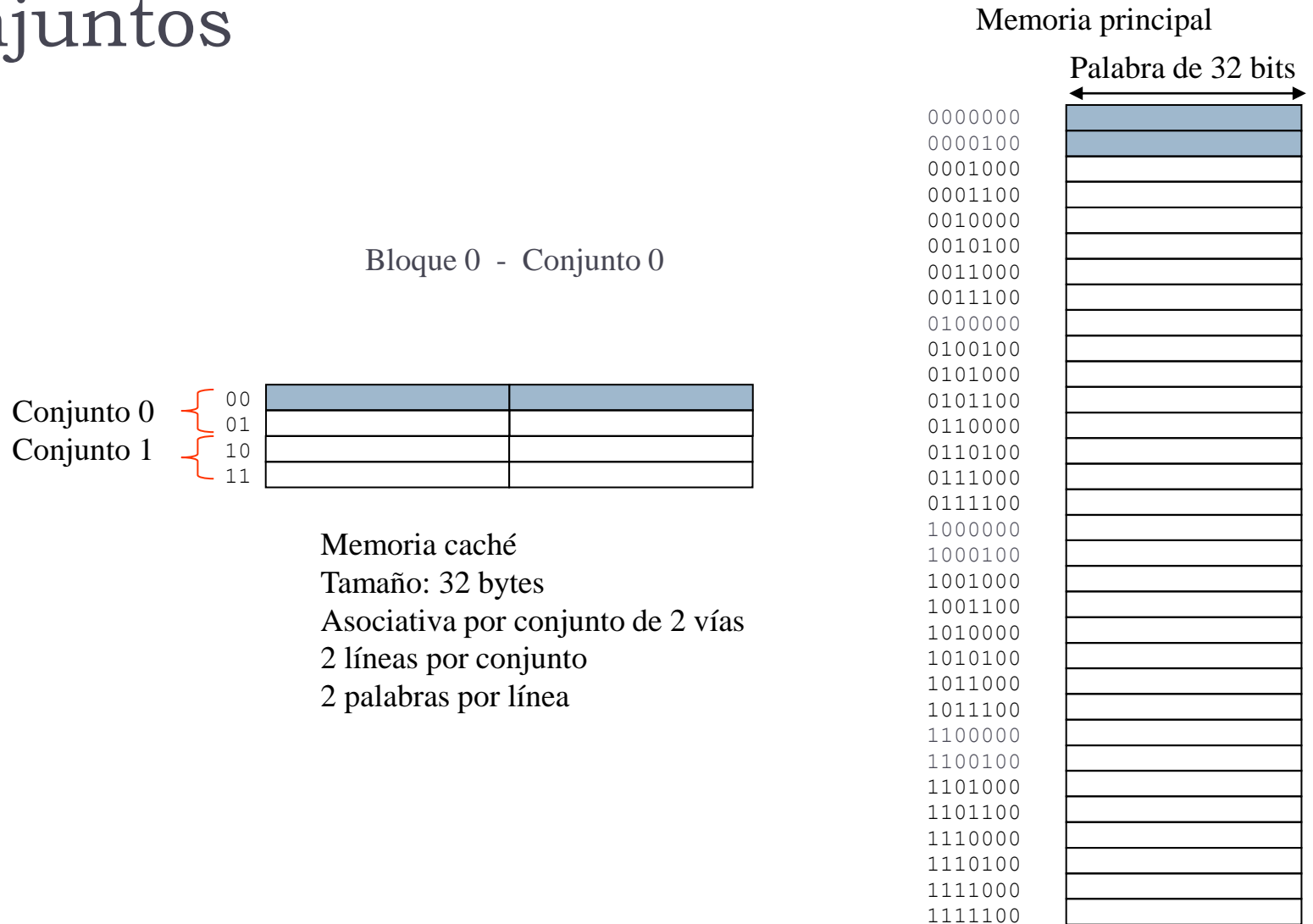
**Memoria principal**

**Palabra de 32 bits**

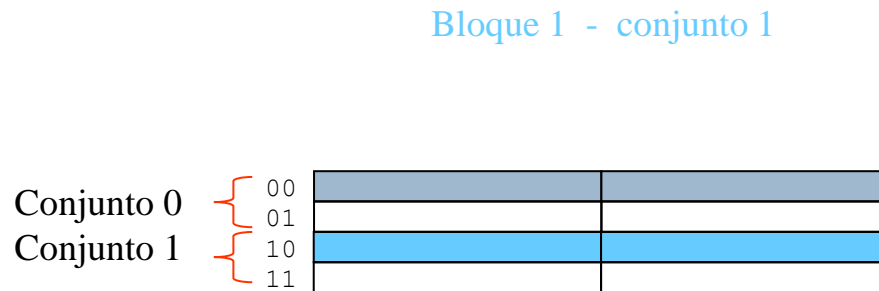
The diagram illustrates a memory structure with 32 rows, each representing a 32-bit word. The words are listed in binary format on the left, and a double-headed arrow above the first row indicates the 32-bit width of each word.

00000000
00001000
00010000
00011000
00100000
00101000
00110000
00111000
01000000
01001000
01010000
01011000
01100000
01101000
01110000
01111000
10000000
10001000
10010000
10011000
10100000
10101000
10110000
10111000
11000000
11001000
11010000
11011000
11100000
11101000
11110000
11111000

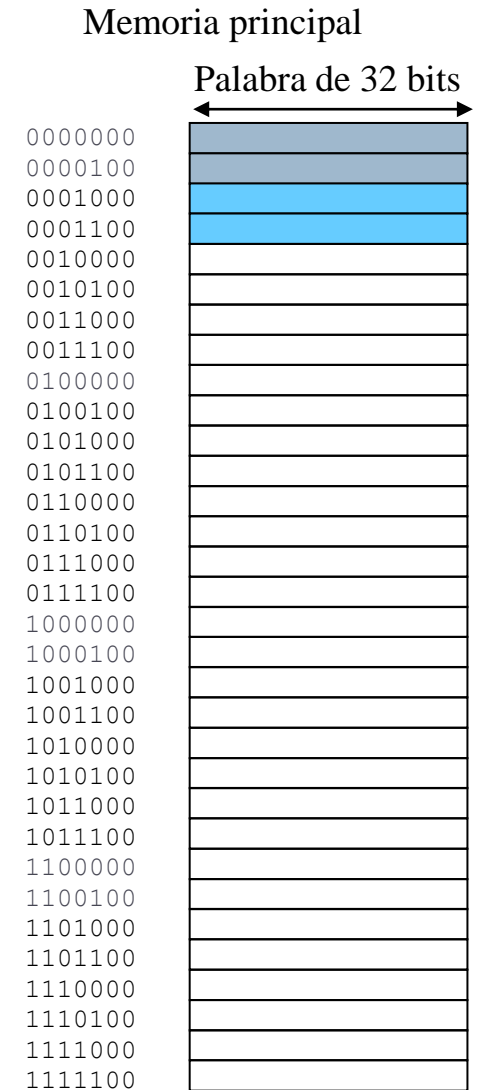
# Correspondencia asociativa por conjuntos



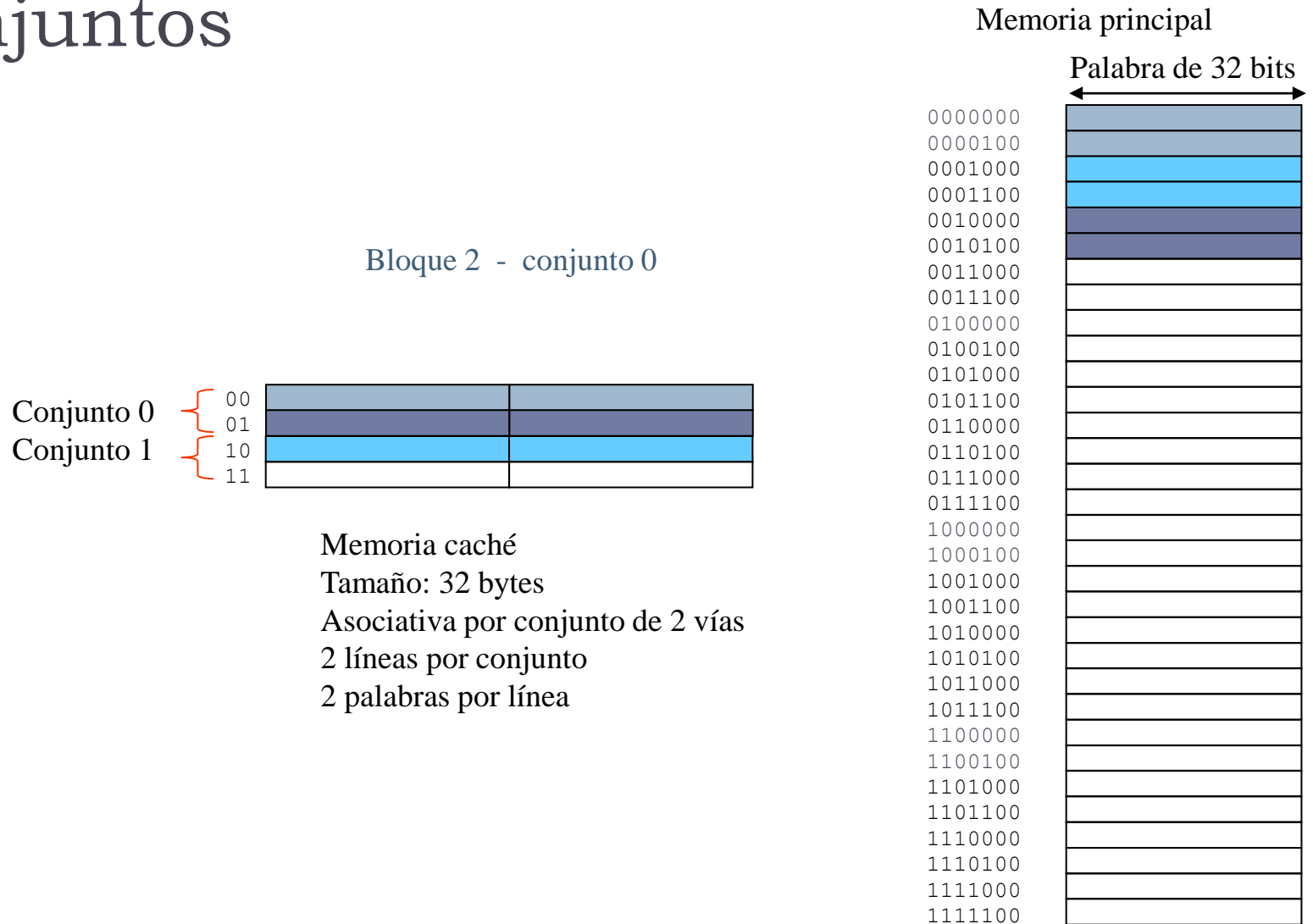
# Correspondencia asociativa por conjuntos



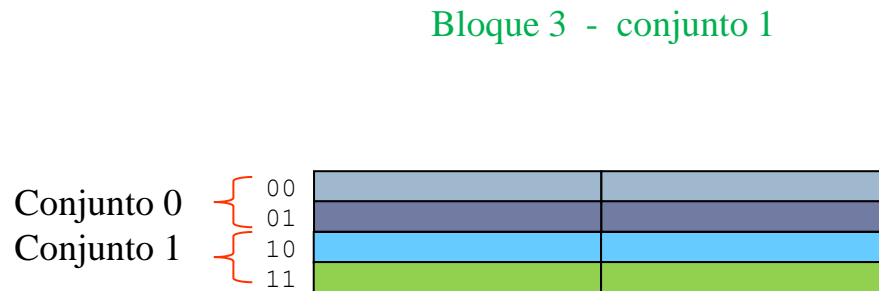
Memoria caché  
 Tamaño: 32 bytes  
 Asociativa por conjunto de 2 vías  
 2 líneas por conjunto  
 2 palabras por línea



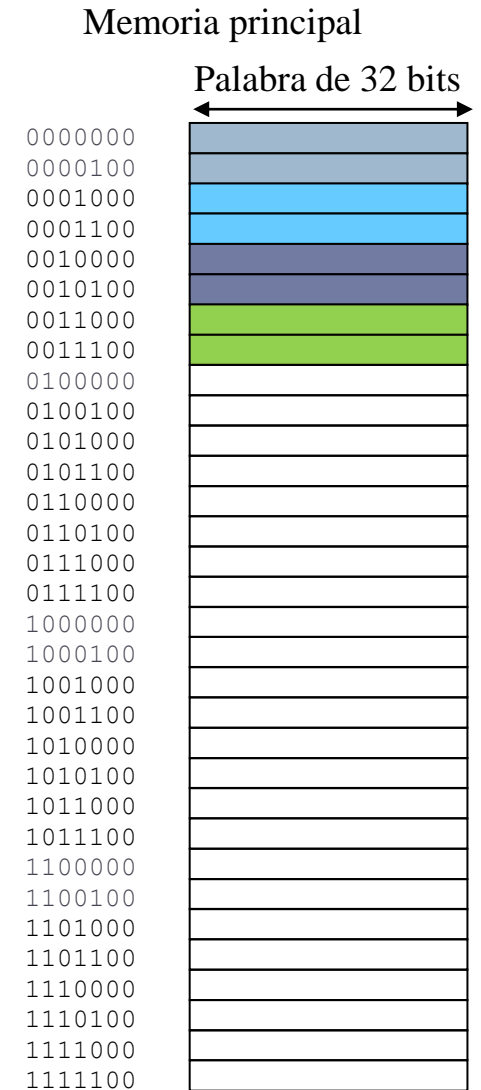
# Correspondencia asociativa por conjuntos



# Correspondencia asociativa por conjuntos

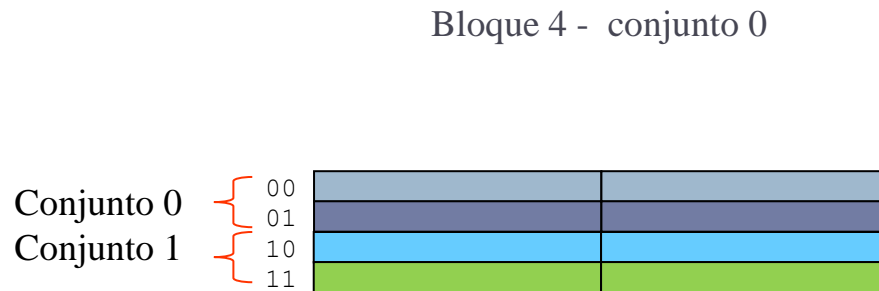


Memoria caché  
 Tamaño: 32 bytes  
 Asociativa por conjunto de 2 vías  
 2 líneas por conjunto  
 2 palabras por línea



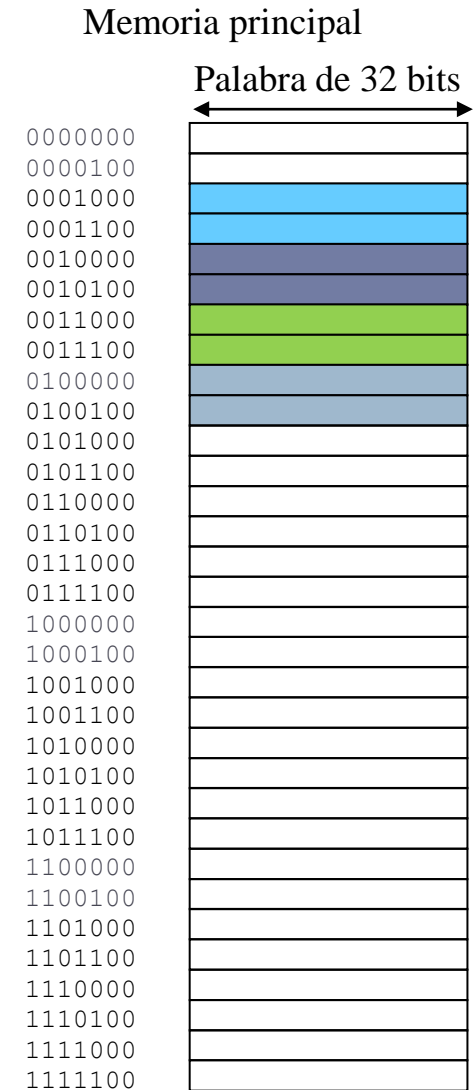


# Correspondencia asociativa por conjuntos



Memoria caché  
Tamaño: 32 bytes  
Asociativa por conjunto de 2 vías  
2 líneas por conjunto  
2 palabras por línea

Habría que eliminar la línea que estaba antes

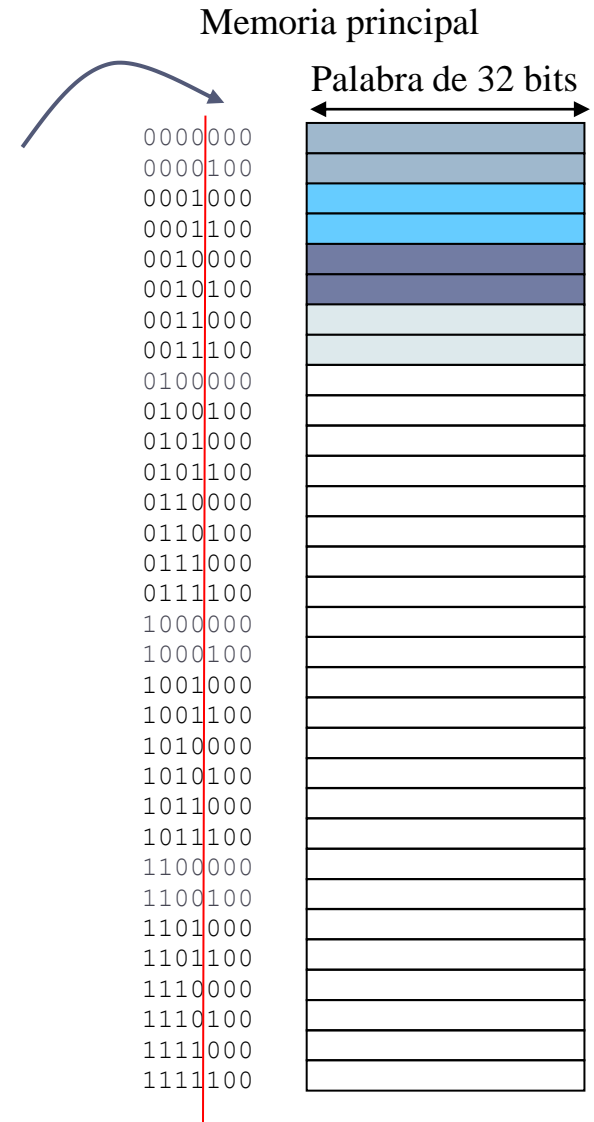


# Correspondencia asociativa por conjuntos

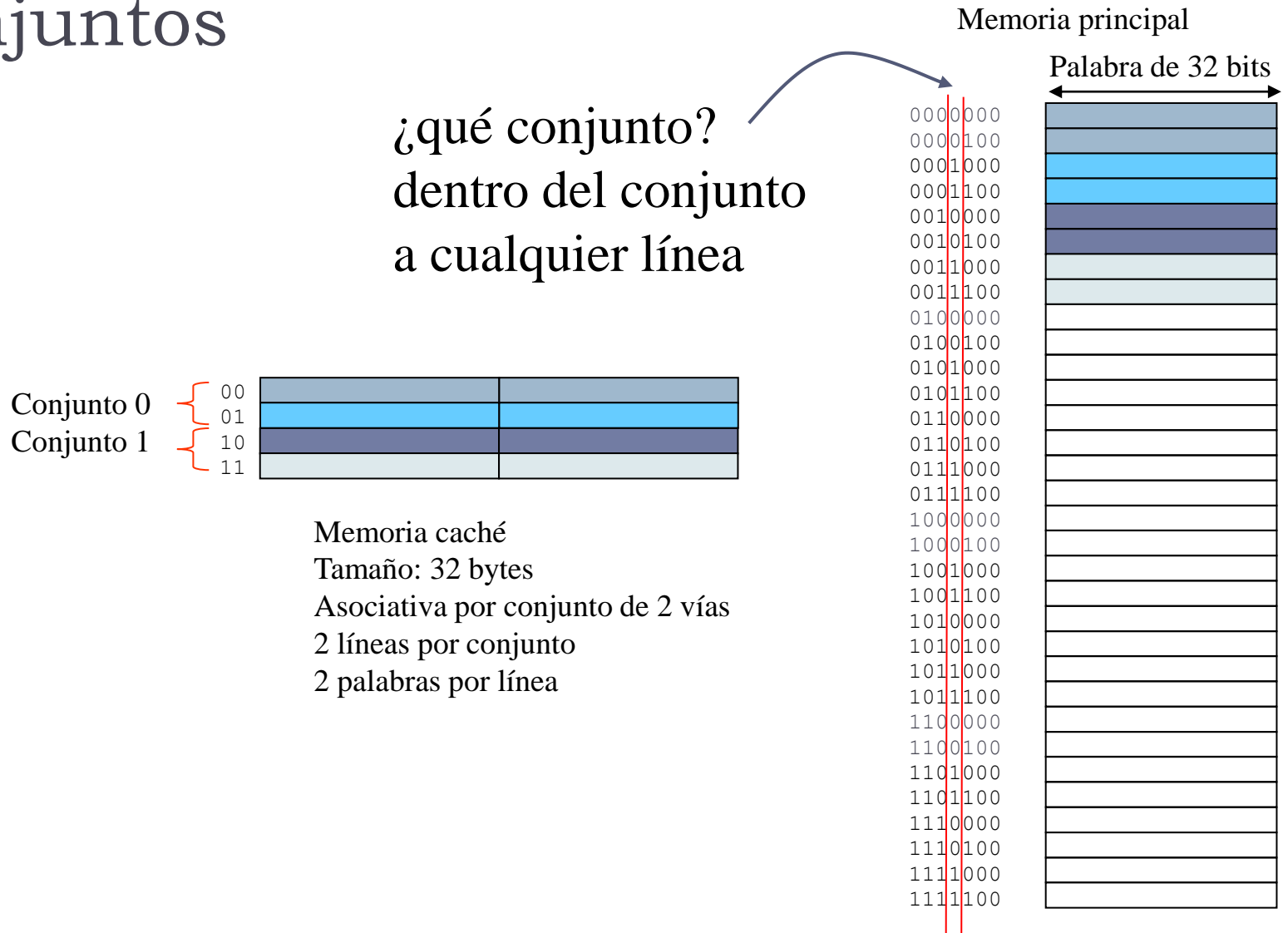
¿qué byte dentro de la línea?  
Líneas de 8 bytes



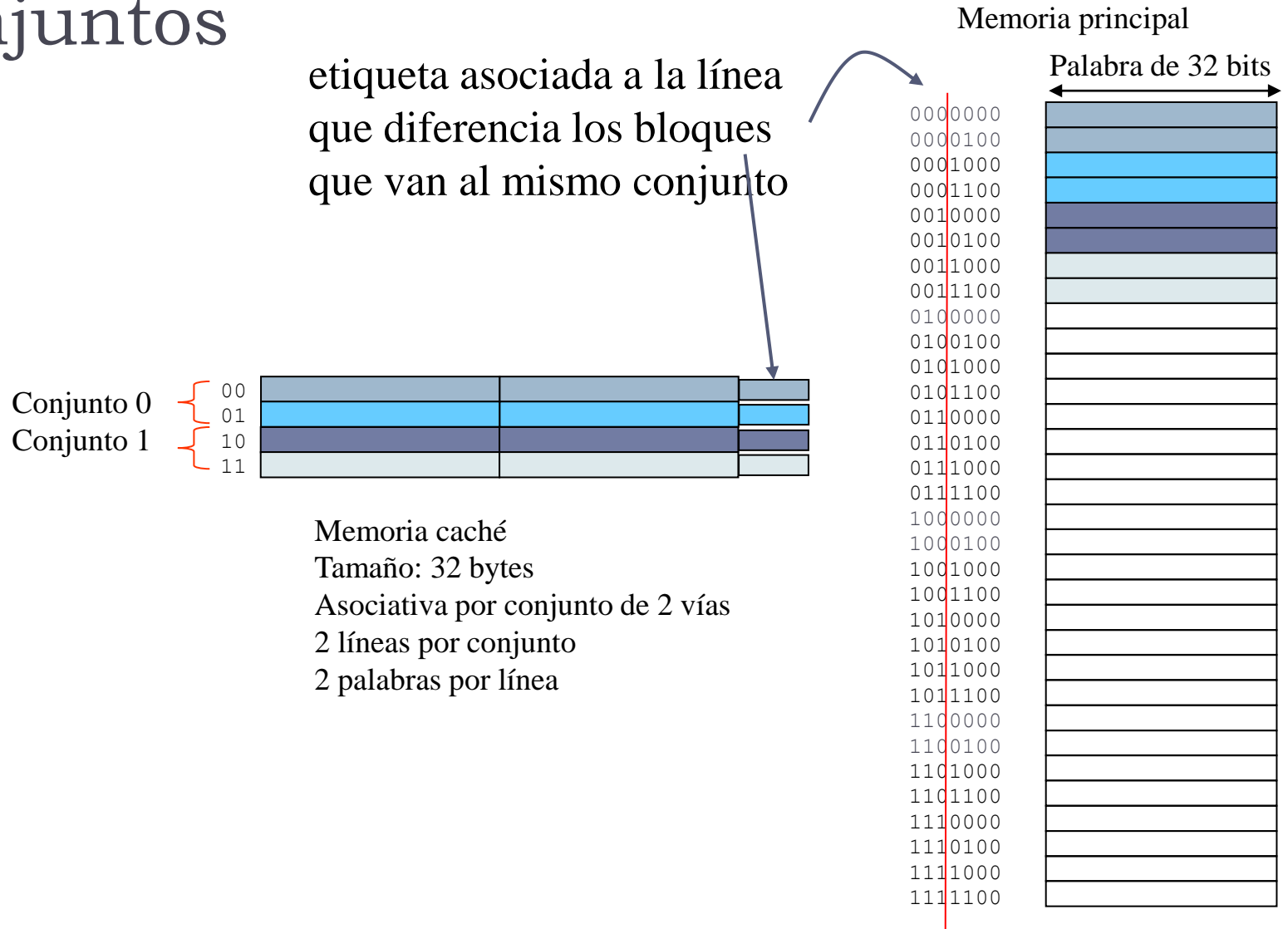
Memoria caché  
Tamaño: 32 bytes  
Asociativa por conjunto de 2 vías  
2 líneas por conjunto  
2 palabras por línea



# Correspondencia asociativa por conjuntos



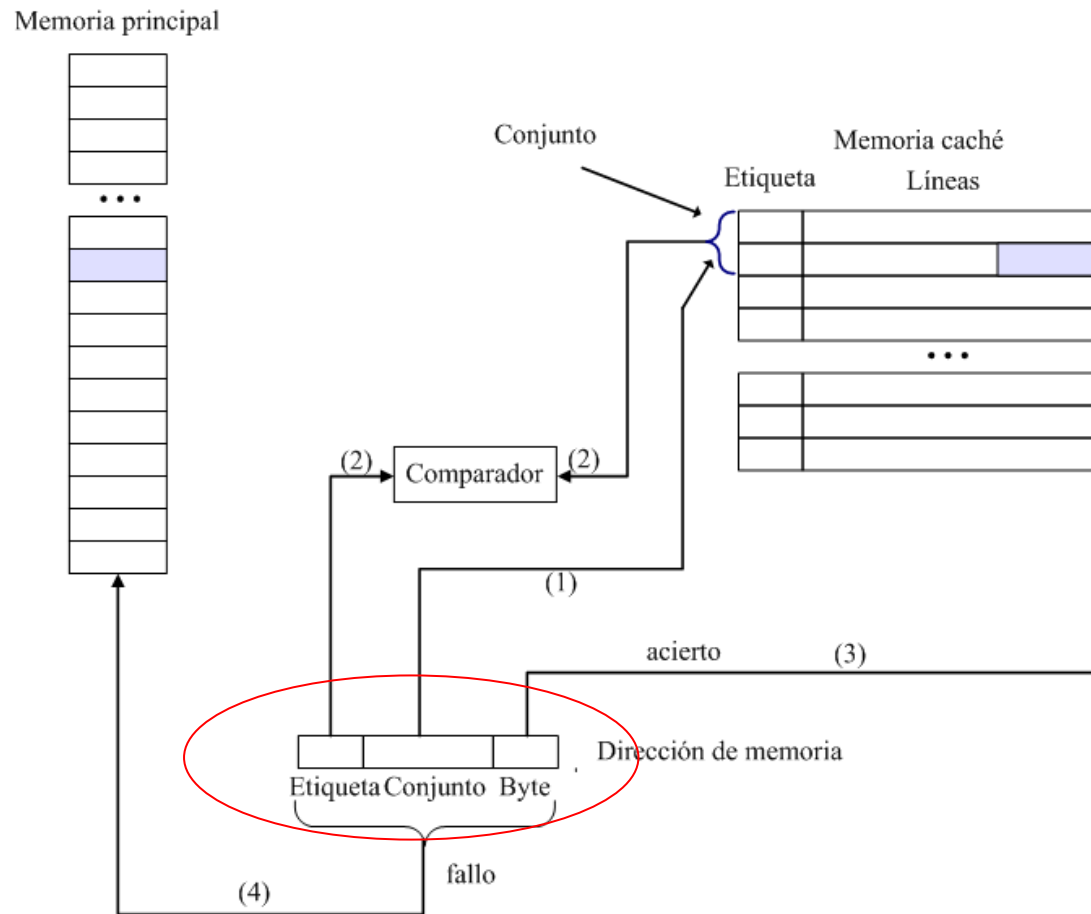
# Correspondencia asociativa por conjuntos



# Correspondencia asociativa por conjuntos

- ▶ Establece un compromiso entre flexibilidad y coste.
  - ▶ Es más flexible que la correspondencia directa.
  - ▶ Es menos costosa que la correspondencia asociativa.

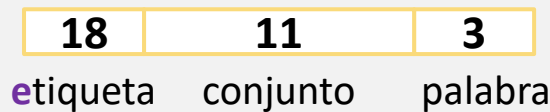
# Organización de una memoria caché asociativa por conjuntos



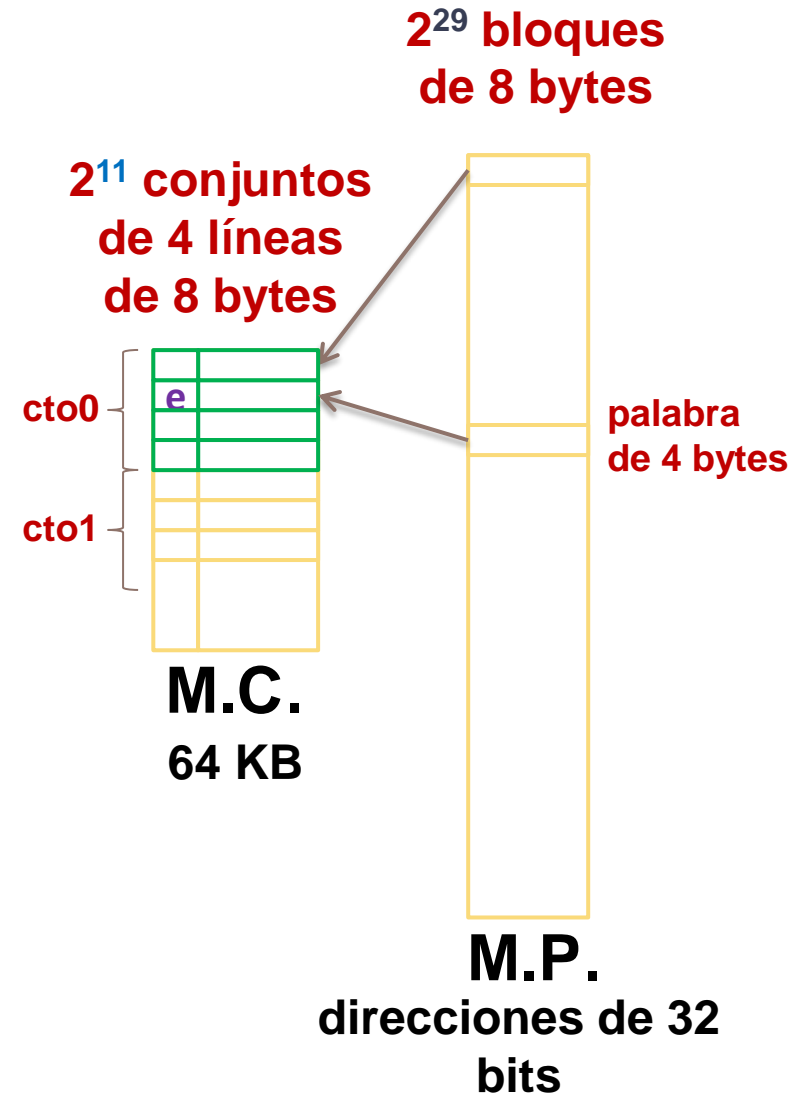
# Función de correspondencia asociativa por conjuntos. Ejemplo

## ► Asociativa por conjuntos:

- Un bloque de M.P. puede cargarse en cualquier línea de caché (vía) de un conjunto determinado
- La dir. de M.P. se interpreta como:



- Si hay una línea con 'etiqueta' en el conjunto 'conjunto', está allí el bloque en caché
- [V] lo mejor de directa y asociativa  
[I] búsqueda menos costosa



# Sustitución de bloques

- ▶ Cuando todas las entradas de la caché contienen bloques de memoria principal:
  - ▶ Hace falta seleccionar una línea que hay que dejar libre para traer un bloque de la MP.
    - ▶ Directa: no hay posible elección
    - ▶ Asociativa: seleccionar una línea de la caché.
    - ▶ Asociativa por conjuntos: seleccionar una línea del conjunto seleccionado.
- ▶ Existen diversos algoritmos para seleccionar la línea de la caché que hay que liberar (para asociativa y asociativa por conjuntos)



# Algoritmos de sustitución

## ▶ FIFO

- ▶ *First-in-first-out*
- ▶ Sustituye la línea que lleva más tiempo en la caché.

## ▶ LRU:

- ▶ *Least Recently Used*
- ▶ Sustituye la línea que lleva más tiempo sin usarse.

## ▶ LFU:

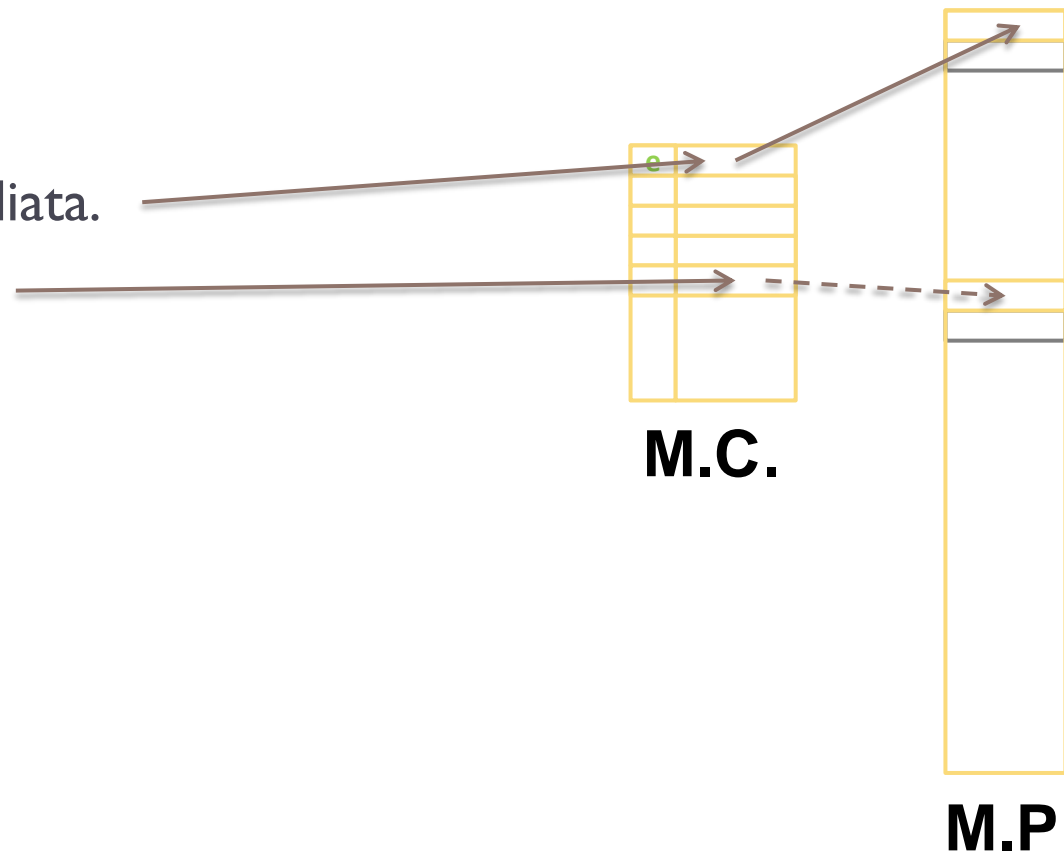
- ▶ *Least Frequently Used*
- ▶ Sustituye la línea que se ha usado menos veces.

# Políticas de escritura

- ▶ Cuando se modifica un dato en memoria caché, hay que actualizar en algún momento la memoria principal

- ▶ Alternativas:

- ▶ Escritura inmediata.
- ▶ Post-escritura.



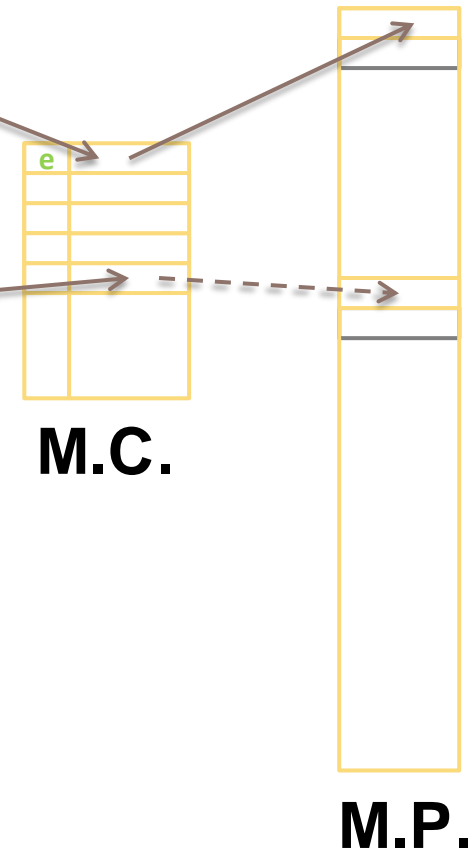
# Política de escritura

## ► Escritura **inmediata**:

- La escritura se hace tanto en M.P. como en cache
- [V] Coherencia
- [I] Mucho tráfico
- [I] Escrituras lentas

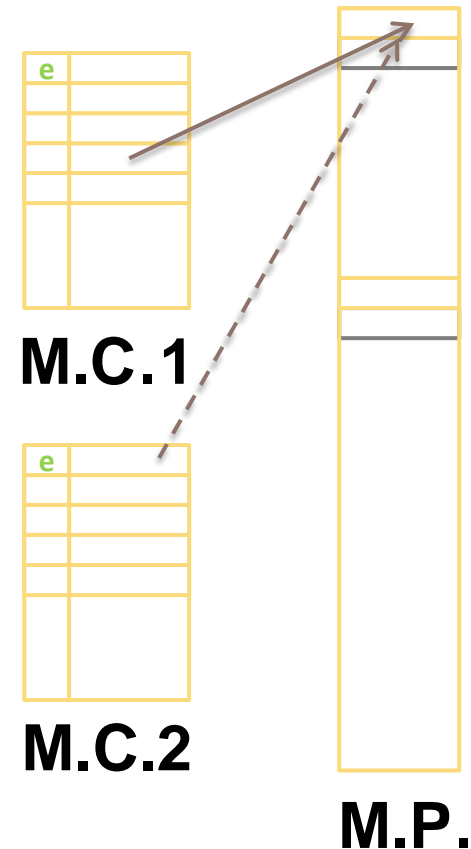
## ► Escritura **diferida**:

- La escritura solo se hace en la caché, indicando en un bit que no está volcada la línea en M.P.
- Al sustituir el bloque (o cuando ↓ tráfico con M.P.) se escribe en M.P.
- [V] Velocidad
- [I] Coherencia + inconsistencia

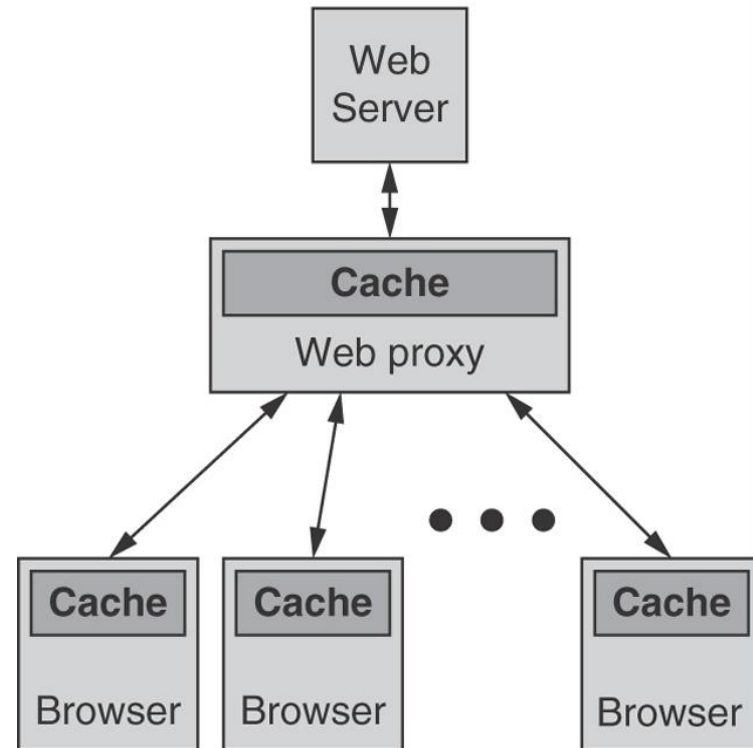
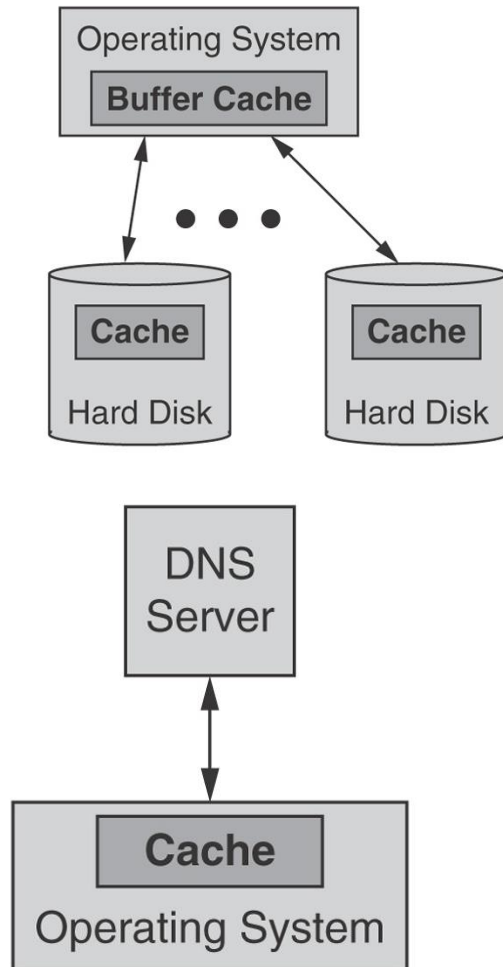


# Política de escritura

- ▶ Ej: CPU multicore con caché por core
  - ▶ Las escrituras en caché solo son vistas por un core
  - ▶ Si cada core escribe sobre una misma palabra, ¿cuál es el resultado final?
- ▶ Ej: módulo de E/S con acceso directo a M.P.
  - ▶ Actualización por DMA puede no ser coherente
- ▶ Porcentaje de referencias a memoria para escritura del orden del 15%.



# Ejemplos de cachés en otros sistemas



Memory Systems  
Cache, DRAM, Disk  
Bruce Jacob, Spencer Ng, David Wang  
Elsevier

Grupo ARCOS

**uc3m** | Universidad **Carlos III** de Madrid

# Tema 5: Jerarquía de Memoria (II)

## **Estructura de Computadores**

Grado en Ingeniería Informática  
Grado en Matemática aplicada y Computación  
Doble Grado en Ingeniería Informática y Administración de Empresas



# Ejercicio

- ▶ Considere un computador de 32 bits con las siguientes características:
  - Memoria física instalada de 256 MB con un tiempo de acceso de 70 ns.
  - Direccionamiento de la memoria por bytes.
  - Tamaño de la memoria caché de 64 KB.
  - Tamaño de la línea 64 bytes.
  - La caché es asociativa por conjuntos de 4 vías.
  - El tiempo de acceso a la caché es de 5 ns y el tiempo de penalización en caso de fallo es de 100 ns.

# Ejercicio

## ► Se pide:

- a) ¿Cuántos bloques tiene la memoria principal?
- b) ¿Cuántos conjuntos tiene la memoria caché?
- c) Dada una dirección de memoria, indique qué partes de la dirección se utilizan para identificar la etiqueta, el conjunto y el byte dentro de la línea.  
Indique también el número de bits de cada parte.
- d) Dada la siguiente dirección de memoria  
0000 0011 1100 0011 0000 0000 1111 1000.  
En caso de encontrarse en la memoria caché  
¿en qué conjunto se almacenaría?
- e) Si el tiempo medio de acceso al sistema de memoria es de 8 ns  
¿cuál es tasa de acierto necesaria para lograr este tiempo?



# Ejercicio (solución)

- a) La memoria tiene un tamaño de línea de 64 bytes =  $2^6$  bytes.  
Por tanto, el número de bloques de memoria principal será

$$\begin{aligned}\text{nbloques} &= \text{tamaño memoria} / \text{tamaño de línea} = \\ &256 \text{ MB} / 64 = \\ &256 \times 2^{20} / 64 = 256 * 2^{14} \text{ bloques}\end{aligned}$$

- b) El número de líneas de memoria caché es

$$\begin{aligned}\text{nlineas} &= \text{tamaño memoria} / \text{tamaño de línea} = \\ &64 \text{ KB} / 64 \text{ bytes} = \\ &2^{16} / 2^6 = 2^{10} = 1024 \text{ líneas}\end{aligned}$$

$$\text{Conjuntos} = N^{\circ} \text{ líneas} / N^{\circ} \text{ vías} = 1024 / 4 = 256 \text{ conjuntos.}$$

# Ejercicio (solución)

- c) La dirección de una caché asociativa por conjuntos se divide en tres partes: etiqueta, conjunto y byte dentro de la línea.
- ▶ Byte: el tamaño de la línea es 64 bytes =  $2^6$  bytes.  
Se necesitan, por tanto 6 bits para identificar el byte dentro de la línea.
  - ▶ Conjunto: Hay 256 conjuntos =  $2^8$ ,  
por lo que se necesitan 8 bits para identificar un conjunto
  - ▶ Etiqueta: para la etiqueta se emplean el resto de los bits de la dirección =  
 $32 - 6 - 8 = 18$

La dirección quedaría:

Etiqueta (18 bits)	Conjunto (8 bits)	Byte (6 bits)
--------------------	-------------------	---------------

# Ejercicio (solución)

- d) Utilizamos el formato de la dirección del apartado anterior:

Etiqueta (18 bits)	Conjunto (8 bits)	Byte (6 bits)
--------------------	-------------------	---------------

El byte asociado a esta dirección se encontraría en el **conjunto 3**

- e) El cálculo del tiempo medio de acceso a memoria se hace con la siguiente fórmula:

$$\triangleright T_{\text{medio}} = t_c + (1-h) * T_{\text{fallo}}$$

$$\triangleright 8 = 5 + (1-h) * 100$$

Despejando h, se tiene  $h = 97/100 = 0,97$  (tanto por uno)

Es decir, **una tasa de acierto del 97 %**

# Ejercicio

- ▶ Sea un computador con una memoria caché y principal con las siguientes características:
  - ▶ Tiempo de acceso a memoria caché de 4 ns
  - ▶ Tiempo de acceso a memoria principal de 80 ns
  - ▶ Tiempo para servir un fallo de caché de 120 ns
  - ▶ Política de escritura inmediata

En este computador se ha observado que la tasa de aciertos a la memoria caché es del 95 % y que cada 100 accesos, 90 son de lectura. Calcular el tiempo medio de acceso a memoria.

# Ejercicio

- ▶ Sea un computador dotado de una memoria cache con las siguientes características:
  - ▶ Tamaño: 16 KB con bloques de 32 bytes (8 palabras)
  - ▶ Tiempo de acceso: 10ns
  - ▶ Esta memoria está conectada a través de un bus de 32 bits a una memoria principal que es capaz de transferir un bloque de 8 palabras en 120 ns
  - ▶ Política de escritura: post-escritura o escritura diferida.
  - ▶ Se pide:
- ▶ Calcular la tasa de aciertos que es necesaria para que el tiempo medio de acceso al sistema de memoria sea de 20 ns.

# Ejercicio

- ▶ Se dispone de un computador con una memoria caché con un tamaño de 64 KB. El tamaño de la línea es de 64 bytes. La caché tiene un tiempo de acceso de 20 ns y un tiempo de penalización por fallo de 120 ns. La caché es asociativa por conjuntos de dos vías. Se pide:
  - ▶ Indique el número total de líneas de caché
  - ▶ Indique el número de conjuntos que tiene la caché.
  - ▶ Indique el número de líneas por conjunto
  - ▶ Haga un dibujo con la estructura de la caché
  - ▶ Diga cuánto tiempo tardaríamos en obtener un dato si se produce un fallo en la caché.

# Ejercicio

- ▶ Sea un computador de 32 bits con el juego de instrucciones del MIPS, que ejecuta el siguiente fragmento de código cargado a partir de la dirección 0x00000000

```
        li      t0, 1000
        li      t1, 0
        li      t2, 0
bucle:  addi     t1, t1, 1
        addi     t2, t2, 4
        beq      t1, t0, bucle
```

- ▶ Este computador dispone de una memoria caché asociativa por conjunto de 4 vías, de 32 KB y líneas de 16 bytes. Calcule de forma razonada el número de fallos de caché y la tasa de aciertos que produce el fragmento de código anterior, asumiendo que se ejecuta sin ninguna interrupción y que la memoria caché está inicialmente vacía.

# Ejercicio

Se dispone de un computador con direcciones de memoria de 32 bits, que direcciona la memoria por bytes. El computador dispone de una memoria caché asociativa por conjuntos de 4 vías, con un tamaño de línea de 64 bytes. Dicha caché tiene un tamaño de 128 KB. El tiempo de acceso a la memoria caché es de 2 ns y el tiempo necesario para tratar un fallo de caché es de 80 ns. Considere el siguiente fragmento de programa.

```
float v1[10000];  
float v2[10000];  
  
for (i = 0; i < 10000; i = i + 1)  
    v1[i] = v1[i] + v2[i];
```

Indique de forma razonada:

- a) El tamaño en MB de la memoria que se puede direccionar en este computador.
- b) El número de palabras que se pueden almacenar en la memoria caché de este computador.
- c) El número de líneas de la caché y número de conjuntos de la caché.
- d) Indique la tasa de aciertos necesaria para que el tiempo medio de acceso al sistema de memoria de este computador sea de 10 ns.
- e) Indique de forma razonada la tasa de aciertos a la caché para el fragmento de código anterior teniendo en cuenta solo los accesos a datos (considere que la variable i se almacena en un registro y que la caché esta inicialmente vacía) .